Série 5. FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE BORDEAUX N° 10.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES DU MUSCLE

THÈSE POUR LE DOCTORAT EN MÉDECINE

Présentée et soutenue le Mercredi 10 Janvier 1883

PAR

JEAN-ALBAN BERGONIÉ

Né à Casseneuil le 7 Octobre 1857

Chargé des fonctions de Maître de Conférences à la Faculté de Médecine de Bordeaux,
Préparateur de Physique près la même Faculté,
Licencié ès Sciences physiques, — Licencié ès Sciences naturelles.

Le Candidat répondra aux questions qui lui seront faites sur les diverses parties de l'Enseignement médical.

Examinateurs de la Thèse : MM. MERGET, *président.*
JOLYET, *professeur.*
BLAREZ, *agrégé.*
ARNOZAN, *id.*

BORDEAUX
G. GOUNOUILHOU, IMPRIMEUR DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE
11, rue Guiraude, 11

1883

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549628_0063

Série 5. FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE BORDEAUX N° 10.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES DU MUSCLE

THÈSE POUR LE DOCTORAT EN MÉDECINE

Présentée et soutenue le Mercredi 10 Janvier 1883

PAR

JEAN-ALBAN BERGONIÉ

Né à Casseneuil le 7 Octobre 1857

Chargé des fonctions de Maître de Conférences à la Faculté de Médecine de Bordeaux,
Préparateur de Physique près la même Faculté,
Licencié ès Sciences physiques, — Licencié ès Sciences naturelles.

Le Candidat répondra aux questions qui lui seront faites sur les diverses parties de l'Enseignement médical.

Examinateurs de la Thèse : MM. MERGET, *président.*
JOLYET, *professeur.*
BLAREZ, *agrégé.*
ARNOZAN, *id.*

BORDEAUX
G. GOUNOUILHOU, IMPRIMEUR DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE
11, rue Guiraude, 11

1883

FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE

DE BORDEAUX

M. DENUCÉ..... Doyen.

PROFESSEURS :

	Messieurs :
Anatomie	BOUCHARD.
Physiologie	ORÉ.
Physique	MERGET.
Chimie	MICÉ.
Histoire naturelle	GUILLAUD.
Pathologie générale	VERGELY.
Pathologie interne	DUPUY.
Pathologie externe	AZAM.
Anatomie pathologique	COYNE.
Histologie et anatomie générale	VIAULT.
Médecine opératoire	MASSE.
Pharmacie	FIGUIER.
Thérapeutique	DE FLEURY
Hygiène	LAYET.
Médecine légale	MORACHE
Médecine expérimentale	JOLYET.
Matière médicale	PERRENS.
Clinique médicale	PITRES. PICOT.
Clinique chirurgicale	DENUCÉ. LANELONGUE.
Clinique obstétricale	MOUSSOUS.

AGRÉGÉS EN EXERCICE :

MM. ARNOZAN.	MM. BOURSIER.	MM. POINSOT.
RONDOT.	LEFOUR.	TESTUT.
LANDE.	DUDON.	CARLES.
SOLLES.	DEMONS.	PÉRIER.
ARMAINGAUD.	GERVAIS-KOYSIEWICZ.	BLAREZ.

MAITRES DE CONFÉRENCES :

Physique	MM. BERGONIÉ.	Histoire naturelle.	MM. PÉRIER.
Chimie et pharmacie.	CARLES.	Accouchements..	LEFOUR.

CLINIQUES ANNEXES.

Clinique méd. des enfants.	MM. NÉGRIÉ.	Maladies vénériennes.	MM. VENOT.
Clinique chirur. des enf.	BITOT.	Maladies mentales...	TAGUET.
Ophthalmologie.....	BADAL.		

Le Secrétaire de la Faculté, F. LAMBERT DES CILLEULS.

La Faculté a arrêté que les opinions émises dans les thèses qui lui sont présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs; elle n'entend leur donner ni approbation ni improbation.

Que ma mère et mes sœurs acceptent la dédicace de ce travail.

Je veux leur témoigner ainsi combien, pour elles, mon affection est vive et ma reconnaissance profonde.

BERGONIÉ.

INTRODUCTION

Dans son livre : *Du Mouvement dans les fonctions de la vie,* M. Marey écrivait, en 1868, que l'élasticité des muscles était de leurs propriétés « la plus difficile à comprendre et à expliquer ». Depuis 1868, toute une bibliothèque a été écrite sur cette propriété des muscles, surtout sur les phénomènes musculaires qui en sont fonctions, et l'énumération des titres seuls des travaux y ayant trait remplirait un grand nombre de pages. Pour cela la question en est-elle plus claire? Je n'ose l'affirmer. Car, si les moindres détails de certains phénomènes musculaires, tels que la secousse, le tétanos, la contracture, par exemple, ont été l'objet des travaux d'hommes d'une autorité scientifique indiscutable; si des mesures d'une rigueur presque mathématique ont été prises concernant ces phénomènes, la durée de leurs phases, les amplitudes et la fréquence de leurs variations, il n'en est pas moins vrai que cette explication si difficile dont parlait M. Marey en 1868, cette théorie absolument physico-chimique de la contraction musculaire, où l'on ne mettrait en jeu aucune de ces actions ou propriétés que l'on dit catalytiques en physique et chimie, et vitales en biologie, n'a pas encore vu le jour. D'abord est-il vraiment possible, en se servant des connaissances acquises, d'édifier une semblable

théorie? Je ne le crois pas; car, si, comme l'affirme le grand physiologiste dont le nom reviendra si souvent dans ce travail, « le progrès en biologie se traduit par les emprunts chaque jour plus nombreux que cette science fait à la physique et à la chimie [1]; » le progrès, dans cette partie restreinte de la physiologie animale dont nous parlons, doit être lent et peu sensible. En effet, peu de lois physiques bien nettes sont invoquées ou mises à contribution pour l'explication des phénomènes de physiologie musculaire; les propriétés communes au muscle et aux corps inorganisés sont peu étudiées, encore pour le muscle sont-elles voilées par des désignations spéciales qui semblent les distinguer et les mettre à part d'autres propriétés identiques des autres corps.

Il est vrai que malheureusement on se trouve à court lorsque, sans sortir de ce chapitre bien limité de la physiologie générale, on recherche parmi les travaux des physiciens des données et des procédés expérimentaux concernant les corps inorganisés pouvant passer, même après de nombreuses modifications, dans les recherches biologiques. Quelque chose manque à la plupart de ceux que j'ai pu parcourir; c'est qu'ils n'ont point été faits en vue d'une application physiologique spéciale. Voilà le vide que je veux essayer de combler dans la mesure de mes forces; c'est après m'être inspiré des travaux des physiologistes que j'essaierai d'appliquer leurs méthodes si délicates de recherche à des phénomènes moins complexes sans doute, puisqu'ils ne se passent pas chez l'être vivant, mais en revanche plus susceptibles d'être connus dans leurs moindres détails, leurs composantes pouvant être modifiées dans une large mesure, quelques-unes même supprimées au gré de

[1] Marey, *Du Mouvement dans les fonctions de la vie*, IIe Leçon, p. 39.

l'expérimentateur. Je veux mettre en regard des quelques résultats que m'ont donnés les corps organisés, au point de vue de l'élasticité, ceux déjà obtenus par les physiologistes en expérimentant sur le muscle, heureux si, par ce rapprochement, j'ai pu faire un peu de lumière sur un sujet si difficile.

Qu'on ne me reproche pas d'être incomplet, car je n'ai jamais songé à traiter à fond dans ce travail une question aussi étendue que celle dont il s'agit. Je n'ai fait qu'effleurer le sujet, me réservant de poursuivre plus tard dans cette voie la recherche de cette théorie physico-chimique de la contraction musculaire dont j'ai parlé plus haut.

En terminant, qu'il me soit permis de témoigner par quelques lignes à mon maître, M. le Prof. Merget, une reconnaissance bien profonde. Ce n'est pas seulement d'avoir mis à ma disposition pleine et entière pour ce travail, les ressources du laboratoire de Physique de la Faculté de Médecine, que je le remercie de tout mon cœur, mais c'est surtout, et bien plus pour cet appui moral et matériel qu'il m'a toujours prêté à l'occasion, c'est pour la direction constante et si dévouée qu'il a donnée à ma jeune carrière scientifique. Je prie M. le Prof. Jolyet de vouloir bien aussi accepter mes remercîments pour les conseils éclairés et les indications précieuses qu'il n'a cessé de me prodiguer pendant toute la durée de mes recherches.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE

DES

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

DU MUSCLE

PREMIÈRE PARTIE

ÉLASTICITÉ DES CORPS ORGANIQUES

CHAPITRE PREMIER

Généralités.

Résumé historique.

Les premiers travaux faits dans un sens physiologique sur l'élasticité musculaire sont dus à Ed. Weber (1). Avant lui, Wertheim (2) avait bien publié des résultats expérimentaux concernant la loi des allongements du muscle sous des charges croissantes, mais son travail, beaucoup plus important au point de vue des corps inorganiques, ne donna aucune impulsion aux recherches physiologiques à faire dans cette voie. Weber ne se contenta pas d'étudier la loi des allongements sur le muscle

(1) Ed. Weber, Art. *Muskelbewegung*, dans *Wagner's Handworterbuch*, t. III, p. 1, *uber die Elasticitat der Muskeln.* (*Arch. de Muller*, 1858.)

(2) Wertheim, *Elasticité et cohésion des principaux tissus du corps humain.— Comptes-rendus de l'Acad. des Sc.*, 28 décembre 1846, et *Ann. de Physique et de Chimie*, XII, 1841; XXI, 1847.

mort, comme l'avait fait Wertheim, il l'étudia aussi sur le muscle en activité. Il découvrit même ce fait d'une grande importance, si diversement expliqué et commenté par tous les physiologistes qui l'ont suivi, que le muscle en activité, tétanisé, s'allonge d'une quantité plus grande sous un même poids que le muscle à l'état de repos ; d'où cette curieuse expérience que l'on a nommée paradoxe de Weber : un muscle au repos chargé d'un poids suffisamment fort s'allonge au lieu de se raccourcir lorsqu'on l'excite.

Volkmann n'adopta pas les résultats de Weber touchant les variations de l'élasticité du muscle à l'état de repos et à l'état d'activité ; il s'engagea même à ce sujet, entre les deux physiologistes, une vive polémique (1) dans laquelle Volkmann reprochait entre autres choses à Weber de ne pas tenir compte dans ses expériences de la fatigue du muscle.

Wundt (2) n'accepta pas non plus les résultats de Weber ; il observa que la quantité dont s'allonge un muscle sous un certain poids ne dépend nullement de son état de contraction ou de relâchement. Il évita l'influence de la fatigue en se servant d'une grenouille vivante et non d'un muscle détaché, et montra que la loi des allongements est la même pour un muscle en repos et pour un muscle actif, que, par conséquent, la force élastique n'est pas identique à la force de contraction, comme l'avait cru Weber.

Les travaux les plus importants qui vinrent ensuite furent ceux de Heidenhaim (3), Fick (4), H. Westerman (5), Donders

(1) La polémique entre Weber et Volkmann se trouve dans *Archiv. f. Anat. u. Physiol.* de 1857 à 1860.

(2) Wundt, *Lehre von der Muskelbewegung*. Brunswick, 1858.

(3) Wundt, *Ueber eine die Muskelelasticität betreffende Frage.*

(4) Wundt, *Ueber die Aenderung der Elasticität des Muskels wahrend der Zuckung.* (*Arch. de Pflüger*, t. IV.)

(5) Wundt, *Ein Beitrag zur Physik des Muskels*. 1868.

et V. Mansfeld [1], puis enfin ceux de M. Marey [2] et de ses élèves, qui appliquèrent à cette étude la méthode graphique. Cette méthode, si féconde en résultats dans toutes les branches de la physiologie, a encore donné, dans les mesures d'élasticité et l'analyse des phénomènes qui s'y rattachent, des preuves de sa supériorité comme méthode de recherches, et de sa fidélité absolue lorsqu'elle est maniée par des observateurs expérimentés. Les travaux de M. Marey sur l'élasticité musculaire consistent surtout dans la mesure de cette élasticité pendant le repos et l'activité du muscle, au moyen de courbes données par un appareil qui lui est propre et qui sera étudié plus loin. Ce savant physiologiste a aussi un peu partout dans ses ouvrages [3] (notamment dans sa Note à l'Académie des Sciences sur les phénomènes intimes de la contraction musculaire) parlé du rôle de l'élasticité musculaire dans la contraction, la fusion des secousses, la production du travail musculaire, etc. Je me propose de reprendre les idées de M. Marey, au fur et à mesure qu'elles se présenteront dans ce travail, en les développant et en les mettant en regard des résultats expérimentaux que j'ai obtenus.

(1) Wundt, *Over die Elasticität der Spieren*. Utrecht, 1863.

(2) Marey, *Du Mouvement dans les fonctions de la vie. — Revue des cours scientifiques*, 1867. — *La Machine animale*, 1873. — *Comptes-rendus de l'Acad. des Sc.*, 1868. *Phénomènes intimes de la contraction musculaire.*

Mendelssohn, *Sur le temps perdu des Muscles. Travaux du laboratoire de Marey* (1878-1879).

Boudet de Pâris, *De l'Élasticité musculaire*, et *Thèse de Paris*, 1880.

On pourra encore consulter sur le sujet les ouvrages suivants :

Ch. Richet, *Physiologie des Muscles et des Nerfs. — De l'addition latente dans les Nerfs et dans les Muscles. Travaux du laboratoire de Marey*, t. I.

Chmoulewitch, *Étude sur la physiologie et la physique des Muscles.* (*Journ. de l'Anat. et de la Physiologie*, 1868.)

Hermann, *Handbuch der Physiologie*, t. I, p. 113 et suiv.

(3) Marey, *La Circulation du sang. Comparaison du rôle de l'élasticité artérielle à celui de l'élasticité musculaire*, p. 166, 1881.

Définitions.

Il règne dans les ouvrages de physiologie, au sujet des termes employés dans la mesure de l'élasticité musculaire, une déplorable confusion. Les termes qui désignent un même fait sont souvent multipliés plus qu'il n'est besoin. Le mot élasticité, qui indique une propriété physique *générale commune à tous les corps sans exception,* est fréquemment employé pour celui de force élastique qui, lui, s'applique particulièrement au corps dont on parle, pris sous une longueur et une section bien définies, tendu par un poids connu et dans des circonstances données. Je tâcherai d'éclaircir autant que possible, par des définitions bien nettes, la valeur de tous ces termes, et pour cela je leur donnerai le sens qu'ils ont en physique sans y rien changer.

Élasticité. — L'élasticité est cette propriété des corps en vertu de laquelle leurs molécules étant dérangées de leur position d'équilibre par une force extérieure, y reviennent exactement lorsque cette force cesse d'agir. Tous les corps sont élastiques, mais ils jouissent de cette propriété à des degrés divers. Si l'on prend, par exemple, deux verges de mêmes dimensions, l'une en acier, l'autre en plomb, et qu'on les fixe dans un étau, on pourra les fléchir toutes les deux d'une très petite quantité sans entraîner une déformation permanente, mais si l'on augmente la flexion peu à peu, il arrivera un moment où la verge de plomb ne reviendra plus exactement à sa position primitive, on dira alors que l'on a atteint et dépassé sa limite d'élasticité. La verge d'acier au contraire résistera à des flexions beaucoup plus prononcées, et ce n'est qu'en augmentant progressivement celles-ci qu'on la déformera d'une

manière durable. On conclura de cette expérience que la *limite d'élasticité* de l'acier est bien plus reculée que celle du plomb.

La division établie par quelques auteurs en corps parfaitement élastiques et corps imparfaitement élastiques, ne me paraît pas être de beaucoup si précise que la notion qui précède ; tous les corps, même les corps mous, peuvent, en effet, être rangés dans les corps parfaitement élastiques s'ils sont déformés par des forces infiniment petites, et, réciproquement, les corps les plus parfaitement élastiques éprouvent des déformations permanentes s'ils sont soumis à des forces très puissantes. Quant aux expressions, *corps très élastiques* ou *peu élastiques*, il convient de s'en abstenir dans le langage scientifique ; tout au plus pourrait-on dire que l'acier, par exemple, est doué d'une *grande* élasticité, pour signifier que la limite de son élasticité est très reculée.

Force élastique. — On nomme *force élastique* ou *force de ressort,* l'énergie avec laquelle un corps tend à reprendre, après une certaine déformation, sa forme et son volume primitifs. Cette force est évidemment égale à l'effort qu'il faut exercer sur le corps pour le maintenir déformé, et la grandeur de cet effort peut servir de mesure à la force élastique.

On voit, d'après cette définition, que la force élastique d'un corps est une quantité essentiellement variable et non caractéristique de ce corps. On pourra, en effet, trouver deux corps ayant des longueurs et des sections différentes, deux verges, par exemple, l'une de bois, l'autre d'acier, qui après avoir subi des déformations inégales, pourront présenter la même force de ressort. Donc, lorsque l'on parlera de la force élastique d'un corps, il faudra définir les dimensions de ce corps et la grandeur de sa déformation.

Il y a plusieurs moyens de mettre en jeu l'élasticité d'un corps, c'est-à-dire de déterminer en lui une force élastique ;

ces moyens sont au nombre de quatre : la flexion, la tension ou traction, la compression et la torsion. Je ne m'occuperai ici que de l'élasticité de tension, la seule qu'il soit intéressant d'étudier dans le muscle.

Si l'on prend un fil métallique fixé à une de ses extrémités et qu'on le tende au moyen d'un poids suspendu à l'autre, tout en restant dans les limites de son élasticité, on verra le fil s'allonger d'une certaine quantité variable avec le poids tenseur. Si l'on représente par P ce poids, par L la longueur du fil, par S sa section, par l l'allongement produit par P, et par C une constante qui dépend de la substance employée, l'expérience prouve que l'on a entre ces quantités la relation suivante :

$$l = C\frac{P\,L}{S}. \qquad (1)$$

Ce que l'on traduit en disant que l'*allongement d'une barre ou d'un fil élastique est en raison directe de sa longueur et du poids qui la tend, en raison inverse de sa section, et proportionnel à une certaine quantité* C *dépendant de sa nature.*

On peut mettre la formule (1) sous la forme suivante :

$$\frac{P}{S} = \frac{1}{C}\cdot\frac{l}{L}. \qquad (2)$$

Or, $\frac{P}{S}$ est le poids agissant sur l'unité de section ; $\frac{l}{L}$ est l'allongement de l'unité de longueur ; désignons par p la quantité $\frac{P}{S}$, par α la quantité $\frac{l}{L}$, par K la quantité $\frac{1}{C}$; il vient :

$$p = \alpha\,K.$$

Et si on fait dans cette équation $\alpha = 1$, il vient :

$$p = K.$$

K est la quantité que l'on nomme COEFFICIENT OU MODULE D'ÉLASTICITÉ ; c'est *le poids,* exprimé en kilogrammes, *qui, agissant sur l'unité de longueur* (le mètre) *et sur l'unité de section* (le millimètre carré), *produirait un allongement égal à l'unité.* On a été obligé de prendre des unités non correspondantes, à

cause des nombres considérables que l'on aurait eus en agissant autrement. Ainsi, le coefficient d'élasticité de l'acier aurait été représenté, si l'on avait admis le mètre carré comme unité de section, par le nombre 19 561 000 000 kilog.

Il est à remarquer que l'allongement indiqué dans la définition du coefficient d'élasticité est rarement physiquement possible pour les corps sur lesquels on expérimente; aussi, la quantité K est-elle une quantité parfaitement définie mathématiquement, mais peu utilisée dans la pratique. On peut d'ailleurs établir une autre formule, au moyen des données de l'expérience, plus facilement applicable que la formule (1). En effet, si l'on désigne par ε l'allongement du corps considéré sous l'unité de longueur, l'unité de section et l'unité de charge, on a de même :

$$l = \varepsilon \frac{PL}{S}; \qquad (2)$$

la quantité ε est ce que l'on désigne par COEFFICIENT D'ALLONGEMENT ÉLASTIQUE. C'est la *quantité dont s'allongerait une barre du corps considéré, de 1 mètre de longueur, sur 1 millimètre de section, tendue par un poids de 1 kilog.* L'introduction de cette quantité dans les calculs relatifs à l'élasticité est très avantageuse comme le fait remarquer M. Monoyer [1]; en effet, supposons que l'on veuille trouver la longueur L_n d'une barre élastique de longueur L, dont le coefficient d'allongement est ε sous une tension de n kilog., on aura :

$$L_n = L\,(1 + \varepsilon n),$$

formule analogue à celle qui, en physique, donne la longueur d'une barre à $t°$ lorsque l'on connaît sa longueur à 0° et son coefficient de dilatation.

Il est à remarquer que, d'après les données précédentes, et

(1) *Physique médicale de Wundt*, traduite par Monoyer. 1871.

pour une même substance, le coefficient d'allongement est en raison inverse du coefficient d'élasticité.

Les termes que je viens de définir sont suffisants pour la connaissance de tous les phénomènes dans lesquels entre comme cause l'élasticité des corps; cependant il en est beaucoup d'autres que les physiologistes emploient et que je ne puis passer sous silence. Les deux expressions que je signalerai en premier lieu, sont celles d'*extensibilité* et de *rétractilité* du muscle. Je n'ai pu trouver nulle part une définition bien précise de ces mots, que beaucoup de physiologistes, quelques-uns tout en s'en défendant, emploient pour désigner des *propriétés* bien caractérisées et distinctes du tissu musculaire. Cependant, dans le livre de M. Ch. Richet (1), je trouve ceci : « Nous dirons donc qu'un corps est très extensible lorsqu'on peut le distendre sans le rompre. Le caoutchouc est très extensible ; le cuivre et le fer sont peu extensibles. » Il me semble que la définition n'est pas suffisante, car on peut distendre beaucoup sans le rompre un fil de cuivre, si on le passe à la filière, et, dans ce cas, l'extensibilité se confondrait avec la ductilité ; on peut aussi beaucoup distendre sans les rompre certains corps à l'état pâteux, et, dans ce cas, l'extensibilité se confondrait avec la viscosité. Il en est de même pour la rétractilité. Je cite M. Ch. Richet : « Nous dirons ensuite qu'un corps est très rétractile, » lorsqu'il revient complètement à sa position première après » en avoir été quelque temps écarté. » Cette définition n'est autre, sous des termes différents, que celle donnée plus haut de l'élasticité. Il n'y a donc pas lieu de conserver ces deux termes qui ont l'air d'attribuer au muscle seul, en tant que corps élastique, des propriétés spéciales n'appartenant pas aux autres corps doués d'élasticité. On pourrait, à la rigueur, désigner

(1) *Physiologie des Muscles et des Nerfs*, Ch. Richet. Paris, 1882.

par extensibilité la phase d'extension du corps élastique lorsque l'on met en jeu son élasticité, et par rétractilité, la phase de rétraction; mais on devrait restreindre à ces désignations seules l'emploi de ces deux termes.

On se sert encore en physiologie d'un autre mot qui semble attribuer aux corps élastiques de nature organique une propriété commune à tous; je veux parler de l'extensibilité supplémentaire. « Lorsqu'on suspend, dit Rosenthal (1), un poids à » l'extrémité d'un fil d'acier, ou d'un autre corps inorganique, » ce poids allonge le corps, qui conserve un allongement aussi » longtemps que le poids y est suspendu; lorsqu'on détache ce » poids, le fil reprend sa longueur primitive. Les corps organi- » ques présentent une propriété différente. Lorsque nous sus- » pendons un poids à un fil de caoutchouc, nous remarquons » que ce fil est allongé dans une certaine mesure; si nous n'en- » levons pas ce poids, nous voyons le fil s'allonger encore » plus, le poids descend toujours, lentement, il est vrai, et tou- » jours plus lentement encore au bout d'un certain temps. » Mais, même après vingt-quatre heures, on observe encore » une petite augmentation dans l'allongement du fil. Lorsqu'on » détache alors ce poids, le fil se raccourcit considérablement, » mais ne reprend pas tout à fait sa longueur primitive, à » laquelle il ne revient que graduellement au bout de plusieurs » heures. Ce phénomène porte la désignation d'extensibilité » supplémentaire des corps organiques. Cette extensibilité se » retrouve très visiblement dans les muscles et produit naturel- » lement quelques difficultés pour l'évaluation exacte de l'exten- » sion musculaire, puisque les mesures varient d'après l'époque » où la mensuration a lieu. Le procédé le plus exact consiste à » ne considérer que l'extension qui se produit à l'instant même

(1) Rosenthal, *Les Nerfs et les Muscles*. Paris, 1878, p. 23.

» en négligeant tout à fait l'extensibilité supplémentaire. » Tout se passe, en effet, dans les corps organiques, dans le caoutchouc en particulier, comme le dit le savant Prof. d'Erlangen; mais il n'en est pas de même pour les corps inorganiques.

Lorsqu'on lit, en effet, les travaux de Wertheim (1) sur ce sujet, on trouve que ce phénomène d'extensibilité supplémentaire, quoique bien moins marqué dans les corps inorganiques, est cependant un fait général. Wertheim attendait de cinq à dix minutes que l'équilibre entre les poids exerçant la traction et la force élastique de la verge dont il voulait mesurer le coefficient d'élasticité, se fût établi. Il prenait de plus la précaution d'abaisser la caisse contenant les poids, au moyen de vis calantes, de façon que la traction exercée sur la verge en expérience augmentât d'une manière insensible. Quant aux mesures des allongements permanents, qu'il prenait aussi d'une façon très précise, elles sont très difficiles, dit-il; « car les corps » élastiques ne semblent plus atteindre d'équilibre vraiment stable » et l'on ne saurait déterminer les longueurs finales que les » verges peuvent atteindre sous l'action de ces charges; même » après une action du poids continuée pendant *huit* jours, un » fil de cadmium n'avait pas cessé de s'allonger. » Le passage suivant est encore plus explicite à mon avis : « Les allonge- » ments permanents sont des fonctions inconnues du temps » pendant lequel le poids a agi; tel poids qui ne produit pas » d'allongement permanent mesurable, en produira un après » une action assez prolongée. » Le fait des allongements supplémentaires est donc général et s'applique à tous les corps élastiques; les corps organiques, tels que le caoutchouc et le muscle, le présentent à un degré plus élevé.

(1) *Loc. cit.*, 1844. Premier mémoire, p. 403 et 439.

CHAPITRE II

Distinctions à établir dans l'étude de l'élasticité musculaire.

L'étude de l'élasticité musculaire peut paraître simple au premier abord si l'on se borne, comme les premiers expérimentateurs, à mesurer brutalement les allongements produits par des charges connues. Mais il n'en est pas de même si, tenant compte des grands progrès récents de l'anatomie générale et surtout des travaux de M. le Prof. Ranvier (1), on prend pour base de cette étude la constitution anatomique du muscle. D'après ce savant anatomiste, l'élément musculaire peut se décomposer en deux parties bien distinctes douées chacune de l'une des propriétés du muscle à l'exclusion de l'autre. Une partie est contractile, l'autre est élastique. Cette appropriation si tranchée est prouvée surabondamment par l'auteur des *Leçons sur l'anatomie générale du système musculaire,* dans les nombreuses pages si claires et si remplies de faits qu'il consacre à cette preuve. Il me semble qu'après leur lecture il ne peut rester aucun doute à ce sujet. En réalité la constitution de l'élément musculaire n'est pas tout à fait aussi simple, et la

(1) Ranvier, *La Technique. — Leçons d'Anatomie générale sur le système musculaire.* 1880.

fig. 1 donne une représentation exacte d'un faisceau primitif du lapin d'après M. Ranvier.

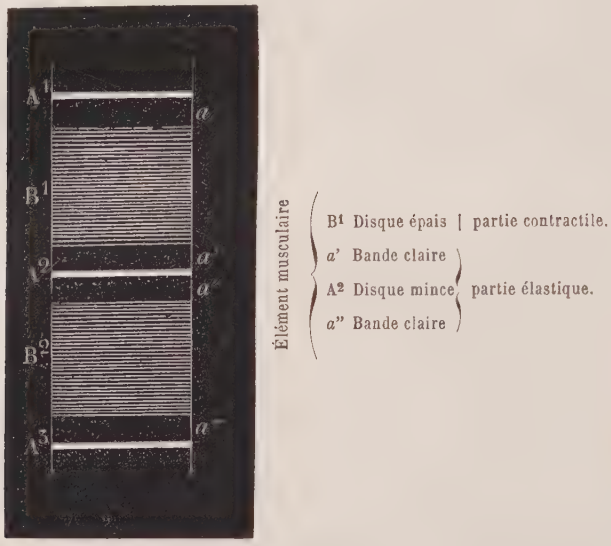

Fig. 1. — Faisceau musculaire primitif du lapin, d'après M. Ranvier.

Malgré cela, la division de l'élément musculaire en partie contractile et partie élastique sera conservée dans la suite à cause de sa simplicité.

D'ailleurs, M. Ranvier lui-même établit explicitement cette division lorsque, parlant du disque mince et des deux espaces clairs voisins, il dit : « Ces parties, selon moi, ne sont nullement » aptes à se contracter, mais elles entrent dans le mécanisme » du faisceau musculaire strié, en qualité d'agents destinés à » venir en aide à la force engendrée par les parties contractiles, » à augmenter son rendement, et à concourir de la sorte à » l'accroissement de l'effet utile. »

Ces deux propriétés du muscle, l'une physique, l'élasticité, l'autre physiologique, la contractilité, étant admises ; lorsque l'on étudiera un phénomène musculaire quelconque, elles

seront en jeu toutes les deux, et il sera fort difficile, sinon impossible, dans l'état actuel de la science, d'attribuer à chacune la part qui lui revient. Par exemple, dans la mensuration de l'élasticité du muscle actif, le phénomène est évidemment très complexe. Si la propriété physique que l'on veut mesurer ne varie pas, ou si ses variations sont relativement simples étant fonctions des données du milieu, température, état hygrométrique, etc..., il n'en est pas de même de la propriété physiologique, la contractilité, qui varie dans des conditions indéterminées avec des quantités nombreuses et difficiles à étudier, telles que l'état pathologique du nerf, l'arrêt de la circulation, l'intensité des excitations, leur nombre, leur fréquence, la fatigue, etc... C'est, il me semble, parce qu'on n'a pas assez tenu compte de la difficulté si grande qu'il y a à séparer les effets dus à l'élasticité de ceux dus à la contractilité, qu'on trouve dans les auteurs des dissemblances si marquées dans la détermination de certains phénomènes musculaires. C'est pour la même raison que certains sont obligés, pour expliquer par l'élasticité seule du muscle des faits dont elle n'est pas la seule cause, d'invoquer des variations de cette propriété, qui se comprennent peu, bien qu'on ait affaire à un corps organisé et vivant. Les autres tissus non contractiles mais doués d'élasticité comme, par exemple, les os, les tendons, les nerfs, présentent-ils des variations si grandes de cette propriété? Non, et je trouve dans le travail de Wertheim qu'une seule cause, une cause *physique,* influe sur ces variations, c'est l'état d'humidité ou de sécheresse de ces tissus.

On est donc en droit de conclure que l'élasticité du muscle est absolument comparable à celle des autres tissus de l'organisme et qu'elle suit les mêmes lois.

Après ces considérations, les déterminations numériques faites sur l'élasticité du muscle vivant me paraissent perdre

beaucoup de leur valeur, quelque exactitude d'ailleurs qu'on ait apportée dans les mesures; car les modifications de la contractilité entraînent forcément des erreurs de même ordre que les grandeurs que l'on veut mesurer. C'est l'élasticité de l'élément musculaire qu'il faudrait pouvoir envisager, et même l'élasticité de la partie élastique de cet élément, ce qui me paraît jusqu'à présent fort difficile.

Les mesures faites sur le muscle mort ou sur le muscle aussitôt après sa séparation du corps de l'animal, après que les excitations dues au contact de l'air ont cessé, me semblent avoir une valeur plus grande. Si l'on prend bien soin de ne pas changer l'état d'humidité du muscle, en le plongeant, par exemple, dans du sérum, ou en l'enfermant dans un espace clos et saturé comme la cage de verre du myographe de Helmholtz, on a des chances pour que les nombres trouvés, le coefficient d'allongement entre autres, se rapprochent, toute proportion gardée, des valeurs vraies qu'on ne peut prendre sur l'élément musculaire. M. Ranvier a, en effet, montré, en fixant un muscle simplement tendu, que la partie élastique seule ne ressemble plus à ce qu'elle est sur un muscle fixé non tendu. Sa dimension dans le sens de la tension a augmenté, tandis que celle du disque contractile n'a pas changé. Doit-on en conclure que, dans la mesure des allongements du muscle entier, ce que l'on observe, c'est la somme des allongements des parties élastiques des éléments musculaires? Pas absolument, car l'expérience de M. Ranvier ne prouve pas que le disque contractile soit complètement inélastique, mais prouve seulement que le coefficient d'allongement de ce dernier disque est beaucoup plus petit, peut-être même négligeable en comparaison de celui de la partie élastique.

CHAPITRE III

Nouveau moyen d'étude de l'élasticité musculaire.

Il me paraît établi, d'après les données qui précèdent, que l'étude du muscle vivant et actif ne peut donner, même faite par un habile observateur, que des résultats erronés. D'autre part, la détermination pure et simple des allongements du muscle mort sous des charges connues, quoique ayant son importance, ne me paraît pas avoir de beaucoup le même intérêt, au point de vue physiologique, que le rôle de cette même propriété élastique du muscle dans les phénomènes tels que la secousse musculaire, le tétanos, etc... Il faut donc trouver une méthode d'expérimentation nouvelle à substituer à celle qu'emploient d'habitude les physiologistes. Cette méthode doit permettre de séparer par l'expérience les effets dus aux deux propriétés du muscle, la contractilité et l'élasticité; de reproduire, autant que possible, tous les phénomènes musculaires, et cela aussi fidèlement que possible. Celle que j'ai adoptée me semble remplir toutes ces conditions. Elle consiste à substituer, comme objet d'étude, au muscle vivant un corps organique élastique, et à animer, pour ainsi dire ce corps, au moyen d'actions mécaniques faciles à manier et à graduer. Jusqu'à quel point ces actions mécaniques peuvent-elles se comparer à la contractilité du muscle? C'est ce que j'examinerai plus loin, lorsque j'aurai à revenir sur le détail des expériences.

Le corps organique choisi est le caoutchouc découpé en fils de diverses grosseurs : il est facile de s'en procurer, et l'on peut avoir, en augmentant ou diminuant la section, des allongements très différents pour le même poids. De plus, l'état hygrométrique de l'air a peu d'influence sur son élasticité, qui n'est variable d'une manière marquée qu'avec les variations de température.

Particularités que présente l'élasticité des corps organiques.

Pour entreprendre l'expérimentation dans le sens indiqué plus haut sur les phénomènes complexes de l'activité musculaire, j'ai été obligé d'étudier et de déterminer les allongements sous des charges connues, subis par le caoutchouc, afin de pouvoir les graduer. C'est, en effet, en rapprochant ces allongements de ceux subis dans les mêmes circonstances par le muscle, que je pouvais seulement me mettre dans des conditions absolument comparables. Mais, avant d'indiquer les procédés employés, je dirai quelques mots des différences constatées entre l'élasticité des corps organiques, du muscle entre autres, et celle des corps inorganiques.

Wertheim, dont les travaux sont le document le plus complet que l'on possède sur l'élasticité des corps inorganiques, a trouvé que pour ces corps les allongements sont proportionnels aux poids employés à les produire. Cette loi est vraie tant que l'on n'a pas atteint la limite d'élasticité du corps considéré (1). Pour

(1) Si l'on cherche à représenter par l'équation d'une courbe la loi indiquée, on arrive à l'expression simple : $y = ax$ qui représente une ligne droite. Le coefficient angulaire de cette droite seul variable avec les divers corps est dans un rapport simple avec le coefficient d'allongement défini plus haut. Car, pour l'unité de longueur et l'unité de section, on a (voir p. 14 et 15) :

$$l = \varepsilon P ;$$

d'où $$\varepsilon = \frac{l}{P} = \frac{y}{x} = a.$$

les corps organiques, il n'en est pas de même. Weber, le premier, en étudiant l'élasticité de la soie, constata que les allongements ne croissaient pas comme les poids. Wertheim reconnut que ces allongements allaient constamment en diminuant pour tous les tissus du corps humain. Il essaya de représenter la loi de ces allongements par une courbe régulière du second degré, mais cette représentation, vraie pour les petits allongements et les allongements moyens, n'était pas exacte lorsqu'il s'agissait d'allongements un peu grands (1). Les allongements réels sont, en effet, de beaucoup inférieurs à ceux qu'indique la courbe, Wertheim l'avoue lui-même, et il suffit de jeter un coup d'œil sur les tableaux de son mémoire pour être convaincu de l'inexactitude de cette représentation.

La méthode graphique, pour indiquer les variations de l'élasticité des corps organiques, me paraît cependant la meilleure à tous les points de vue. On verra, dans la suite, qu'elle a été largement mise à contribution dans ce travail; mais elle a été appliquée, non point en partant d'une donnée mathématique basée sur deux expériences seulement, comme le faisait Wertheim, mais en se servant d'un appareil apte à inscrire d'une manière continue les allongements d'un corps élastique, sous des tractions variant d'une manière uniforme.

Appareils pour mesurer les allongements des corps organiques.

Les moyens employés pour mesurer les allongements élastiques des corps organiques, des muscles en particulier, sont

(1) L'équation donnée par Wertheim $y = ax^2 + bx$ est celle d'une hyperbole dont le sommet serait placé à l'origine des coordonnées. Il déterminait pour chaque corps la valeur des deux coefficients a et b au moyen d'un système de deux équations dans lesquelles x et y étaient remplacées par les valeurs trouvées dans la détermination du plus grand et du plus petit allongement mesurés.

très nombreux. Je n'en décrirai sommairement que quelques-uns, les principaux, afin de montrer de quel côté ils laissent à désirer, et quel crédit il faut accorder aux observations faites avec leur aide.

Wertheim (1) suspendait le muscle à un point fixe, prenait deux repères sur la substance musculaire et observait au cathétomètre les écartements produits entre ces deux points par les diverses charges. Les allongements successifs étaient obtenus en prenant la différence entre les distances verticales correspondantes trouvées et la distance verticale primitive. Ce procédé donne des mesures très précises, surtout avec un bon cathétomètre (celui de Wertheim donnait le $0^{mm}01$). Mais, outre que la précision n'est qu'apparente dans ces conditions, les mesures d'élasticité des corps organisés présentant des causes d'erreurs beaucoup plus considérables, la difficulté était de déterminer à quelle période de l'allongement la mesure cathétométrique devait être prise. Un muscle continue, en effet, à s'allonger, quelquefois plus de trente minutes après avoir été chargé.

E. Weber opérait à peu près comme Wertheim (2). Le muscle était fixé à l'une de ses extrémités, et on lisait les allongements par la projection d'un repère sur une échelle graduée placée derrière le muscle le long d'un support vertical.

D'après Rosenthal (3), l'appareil de Du Bois Reymond est ainsi construit: « Le muscle est fixé d'une manière invariable à » un support; le tendon supérieur étant soutenu par les mors » d'une pince. On suspend, au tendon inférieur, au moyen d'un » crochet fin une petite verge portant des divisions métriques » très fines. Au-dessous de cette échelle, la vergette se bifurque

(1) *Loc. cit.*, deuxième mémoire.
(2) *Handwörterbuch der Physiologie de Wagner*, t. III, p. 69.
(3) *Loc. cit.*, p. 24.

» en deux bras, et, dans l'espace qu'ils laissent entre eux, on » suspend un plateau de balance, pour les poids dont on veut » charger le muscle. » On lisait les déplacements verticaux sur la petite règle, au moyen d'une lunette fixe à réticule. Les défauts de cet appareil et du précédent sont les mêmes que ceux déjà signalés dans celui de Wertheim.

Je passerai maintenant à la description de l'appareil imaginé par M. Marey, qui est de beaucoup le plus parfait, à mon avis, de ceux qui ont été employés (1). M. Marey a construit un appareil pour éliminer les causes d'erreur signalées dans ceux décrits précédemment. Il s'est convaincu, en lisant les travaux de Wertheim et de Weber, de la nécessité de faire entrer en ligne de compte, dans la détermination du module d'élasticité, le temps employé à la mesure des allongements et à l'addition des nouveaux poids. Il s'est arrêté à l'appareil dont voici le principe. Un fil attaché au tendon du gastrocnémien d'une grenouille actionne sur son parcours un style inscripteur frottant sur le cylindre enfumé. L'extrémité de ce fil se réfléchit sur une poulie, et au lieu de supporter un plateau pouvant recevoir des poids ordinaires, supporte un godet de verre équilibré au moyen d'un contrepoids, dans lequel on fait écouler du mercure. L'écoulement du mercure a lieu au moyen d'un entonnoir placé au-dessus. M. Marey, pour inscrire de très grands allongements et pour éviter l'erreur due à l'arc de cercle décrit par le style, s'est servi plus tard d'un chariot, roulant sur des rails, dont le style inscripteur restait toujours parallèle à lui-même : « Les » choses étant ainsi disposées, dit M. Marey, supposons que » le cylindre tourne sans que le muscle soit chargé d'aucun » poids, le chariot, immobile sur ses rails, tracera par sa pointe » une circonférence parfaite autour du cylindre ; ce sera, sur

(1) Marey, *Du Mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 294 et suiv.

» le papier déployé, l'abscisse de notre courbe. Je fais arriver, » par un écoulement régulier, le mercure dans le flacon; aus- » sitôt le chariot entre en marche, entraîné par la déviation du » levier qui le pousse, et la pointe trace sur le cylindre une » courbe qui exprime toutes les phases de l'allongement du » muscle. »

L'appareil employé par M. Marey a ceci de particulier, que l'on peut obtenir la courbe d'élasticité, aussi bien par soustractions successives à la charge que par additions; or ceci a un avantage, c'est celui d'indiquer si la limite d'élasticité du muscle a été dépassée. La fig. 2 représente l'une des courbes obtenues par M. Marey, au moyen d'un muscle de grenouille dans laquelle cette limite a été dépassée.

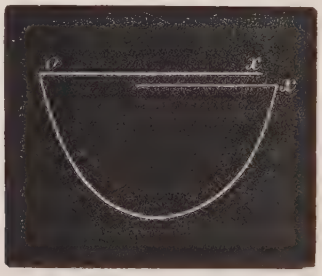

Fig. 2. — Courbes d'élasticité d'un muscle avec addition et soustraction graduelle des charges, d'après M. Marey.

Je ferai quelques critiques à l'appareil du savant physiologiste. D'abord, l'écoulement du mercure au moyen d'un entonnoir effilé ne me paraît pas devoir être suffisamment constant pour qu'on puisse exactement calculer la charge supportée par le muscle à un moment donné. Le seul moyen, en effet, de calculer cette charge, est de la supposer proportionnelle au temps écoulé depuis l'origine de la courbe. Or, cette supposition, base essentielle de tout calcul d'allongement, me semble ne pouvoir être faite si l'on emploie le dispositif représenté

dans l'ouvrage de M. Marey. En se servant, pour l'écoulement, d'un liquide de moindre densité, les variations dans la vitesse de la veine auraient moins d'influence sur la forme de la courbe; mais je crois qu'avec le mercure cette influence ne doit pas être négligeable. De plus, pour mesurer la charge maxima supportée par le corps élastique (mesure qui est nécessaire pour établir la proportion dont j'ai parlé plus haut), il faut faire une pesée, laquelle se renouvelle après chaque expérience et nécessite un certain dérangement de l'appareil.

Malgré ces imperfections, l'appareil de M. Marey me semble de beaucoup préférable à celui que M. Boudet de Pâris a employé pour le même objet et dont je trouve la description dans sa thèse inaugurale : « L'appareil qui nous a servi, dit-il, » est le myographe à poids de M. Marey, légèrement modifié » par nous. La planchette sur laquelle la grenouille est fixée » au moyen d'épingles, porte sur l'un de ses côtés un levier » très léger, en bambou, terminé par une mince plume de » baleine. La longueur de ce levier, y compris celle de la » plume, est de 11 centimètres. A un centimètre de son articu- » lation sont fixés deux fils qui s'écartent perpendiculairement » à son axe. L'un de ces fils va s'attacher au tendon du gastro- » cnémien de l'animal en expérience. L'autre, qui n'est en » réalité que la continuation du premier, passe d'abord dans » la gorge d'une petite poulie de renvoi et supporte un plateau » de liège sur lequel sont placés les poids destinés à la charge » du muscle.

» Pour contre-balancer le poids même de ce petit plateau, un » autre fil est enroulé autour de l'axe de rotation du levier et » supporte à son tour une petite capsule dans laquelle on verse » une quantité suffisante de mercure..... Les changements de » forme du muscle (allongements et raccourcissements) se trou-

» vent de la sorte amplifiés dix fois par le levier qui les inscrit » sur un cylindre recouvert de noir de fumée (1). »

Pour faire cette inscription, M. Boudet place dans le plateau le poids variable, le cylindre étant immobile ; le muscle s'allonge et le style inscrit cet allongement amplifié. Puis, il fait tourner le cylindre d'une petite quantité et inscrit l'allongement *supplémentaire*. Cela fait, il augmente le poids et recommence la série d'opérations. Il obtient ainsi des lignes brisées qui représentent les allongements du muscle sous les charges indiquées pour chacune d'elles.

M. Boudet pense qu'en joignant les points ainsi obtenus sur les graphiques qu'il donne, on obtiendra la courbe signalée par Wertheim, représentative des variations de l'élasticité du muscle. C'est là une erreur; car, pour être autorisé à tracer cette courbe, il faudrait que les abscisses de la ligne brisée fussent toujours proportionnelles aux poids successifs. Or c'est ce qui n'a pas lieu dans les graphiques que donne M. Boudet. En second lieu, si l'on décrivait cette courbe, devrait-elle passer par les points indiquant la fin de l'extensibilité *immédiate* ou par ceux qui indiquent (avec une ordonnée différente) la somme des allongements dus à cette extensibilité et à l'extensibilité supplémentaire? Je ne trouve aucune indication à ce sujet.

De plus, il n'est pas indifférent de faire avancer le cylindre à un moment ou à l'autre; le mouvement de rotation ayant, en effet, pour but d'indiquer sur la courbe les allongements qui doivent être rapportés à l'extensibilité supplémentaire et ceux dus à l'extensibilité immédiate. Or, il est très difficile de saisir le moment opportun pour effectuer ce mouvement; car, d'après

(1) Boudet de Pàris, *De l'Élasticité musculaire*. Thèse de Paris, 1880.

M. Boudet lui-même, l'extensibilité supplémentaire agissant surtout dans les premiers instants qui suivent l'application d'une charge, un léger retard ou une trop grande hâte de la part de l'expérimentateur modifieront sensiblement les résultats. Il est à remarquer de plus que les deux effets successifs signalés plus haut ne peuvent être distingués au moyen d'aucun phénomène particulier, ce qui augmente encore la difficulté (1).

Dans l'appareil que j'ai été amené à imaginer, j'ai essayé de faire disparaître les imperfections que je viens de signaler dans

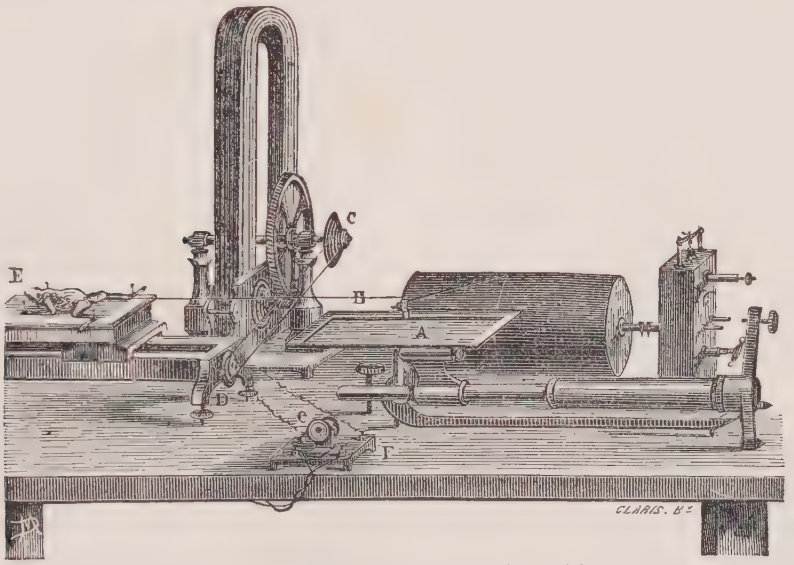

Fig. 3. — Appareil de l'auteur pour le tracé des courbes d'élasticité des corps organiques.

les mesures d'élasticité prises par les différents auteurs. Cet appareil, dont l'ensemble est représenté par la fig. 3, peut se décomposer en deux parties bien distinctes; l'une formée d'un appareil moteur servant à tendre progressivement le corps

(1) Je n'ai pas fait mention de l'appareil de Blix dont parle l'excellent livre de physiologie de Beaunis, n'ayant pu me procurer son mémoire imprimé à Upsal en 1874.

élastique, l'autre servant à inscrire ses allongements et les tensions correspondantes.

Pour arriver à tendre d'une manière uniformément croissante ce corps élastique, j'ai pris pour point de départ un principe de mécanique expérimentale, auquel aucun expérimentateur, je crois, n'avait encore songé. Ce principe peut se formuler ainsi :

Les flèches de flexion d'une lame élastique d'acier sont proportionnelles aux poids qui ont servi à les produire.

Coulomb a vérifié ce principe par l'expérience et les travaux de T. Kupffer (1) et Wiedmann ont confirmé les résultats obtenus par ce dernier physicien (2).

Ce principe étant une fois admis, voici les dispositions expérimentales adoptées. Sur la plaque métallique A de la fig. 3 est disposée une pince à écrou pouvant glisser dans une rainure pratiquée dans la plaque et être fixée en un point quelconque de cette rainure. Dans cette pince est fortement serrée une lame flexible d'acier, placée de champ, dont on peut à volonté augmenter ou diminuer la partie fléchissante. De l'extrémité de cette partie fléchissante, part un fil B au moyen

(1) *Recherches expérimentales sur l'élasticité des métaux faites à l'Observatoire physique central de Russie*, par A.-T. Kupffer, 1860.

(2) En général, si on représente par P la force appliquée normalement à l'extrémité d'une barre flexible; par L, la longueur de cette barre; par l sa largeur prise dans le sens perpendiculaire à la force de flexion; par e son epaisseur; par δ son coefficient d'élasticité de flexion, la valeur f de la flèche est donnée par la relation :

$$f = \frac{PL^3}{\delta e^3 l}$$

Si la quantité P varie seule dans la formule précédente, les autres quantités restant constantes, f variera proportionnellement à P et l'on pourra écrire :

$$f = nP$$

n étant une constante à déterminer une fois pour toutes. D'où il résulte que l'on peut, connaissant la flèche de flexion d'une lame élastique, déduire très simplement la force qui la produit.

On s'est assuré au cathétomètre que les lames employées suivaient toujours la loi des flexions et l'on a rejeté celles qui ne conservaient pas dans les limites étendues toutes leurs qualités élastiques.

duquel doit s'exercer la traction sur la lame élastique (1). C'est sur le trajet de ce fil inextensible qu'est placé le corps élastique dont on veut connaître les allongements.

Les flexions de la lame sont inscrites sur le cylindre enfumé au moyen d'un long style formé par le prolongement même de la lame flexible, convenablement amincie et tordue sur elle-même au point d'attache du fil, de manière à présenter le maximum de rigidité dans le sens où doit se faire l'inscription.

Pour opérer la traction sur le fil, j'étais forcé de me servir d'un appareil qui rendît cette traction bien uniforme, dont le mouvement fût régulier, sans à-coup, et dont la vitesse fût modifiable à mon gré. Après bien des essais infructueux, je me suis arrêté à la disposition de la figure. Le moteur est une machine de Gramme de laboratoire, dans l'anneau de laquelle on fait passer un courant constant (2). Le mouvement ainsi produit se transmet au moyen d'une poulie à plusieurs gorges C, et d'une courroie à une seconde poulie D fixée sur l'extrémité d'une vis sans fin. Cette vis en tournant fait mouvoir, au moyen d'un écrou mobile, un chariot E, qui, dans son mouvement de translation, en s'écartant de plus en plus de la lame métallique fixe, tend le fil inextensible et fléchit la lame d'acier. Cette dernière disposition est analogue à celle que M. Marey a donnée à son chariot automoteur; elle en diffère en ce point, c'est que la vis mobile, au lieu d'être mue par un mouvement d'horlogerie peu puissant, est mue par un moteur d'un maniement très facile et d'une force variable au gré de l'expérimentateur.

Le chariot glisse sur des rails et porte une plate-forme de bois garnie de liège sur laquelle on peut disposer les corps

(1) Pour les besoins du dessin le fil a été figuré beaucoup plus long qu'il ne l'est en réalité.

(2) Un galvanomètre étant placé sur le trajet des fils, on peut à chaque instant s'assurer de la constance du courant moteur.

élastiques sur lesquels on expérimente. On peut ainsi soumettre facilement ces corps à toutes les influences modificatrices de leur élasticité, telles que température, dessèchement, humidité, etc... La figure représente sur le chariot une grenouille dont le muscle gastrocnémien, détaché sur toute son étendue et fixé seulement par son tendon supérieur, est soumis à des tractions croissantes.

Le courant qui anime la machine de Gramme est commandé par un commutateur de Rumkorff, F. Ce commutateur permet d'inverser le courant à un moment donné, de changer par conséquent le sens de rotation de l'anneau, et d'avoir des courbes par décroissance aussi bien que par croissance des tractions.

Étude de l'appareil.

Avant de passer à l'étude des courbes obtenues au moyen de l'appareil précédemment décrit, il est d'absolue nécessité de faire une étude de cet appareil et d'analyser les divers cas qui peuvent se présenter dans son maniement.

J'examinerai d'abord le cas où aucun corps élastique n'est interposé entre le point d'attache du fil sur la lame flexible et son extrémité fixée au chariot mobile. Dans ces conditions, supposons que l'on mette d'abord en marche le régulateur qui meut le cylindre, et qu'après un tour complet de celui-ci on tourne le commutateur qui met le chariot en mouvement. Celui-ci, se mouvant d'un mouvement uniforme, va, par l'intermédiaire du fil inextensible, fléchir graduellement la lame et l'on aura le graphique représenté dans la fig. 4. OO' est la ligne décrite par le style, le chariot restant en repos; AF est la ligne décrite par le style, le chariot étant en mouvement. Pour un point quelconque M de cette ligne, l'ordonnée MP

représentera la flèche de flexion de la lame (1), et l'abscisse AP le temps écoulé depuis le commencement de la flexion.

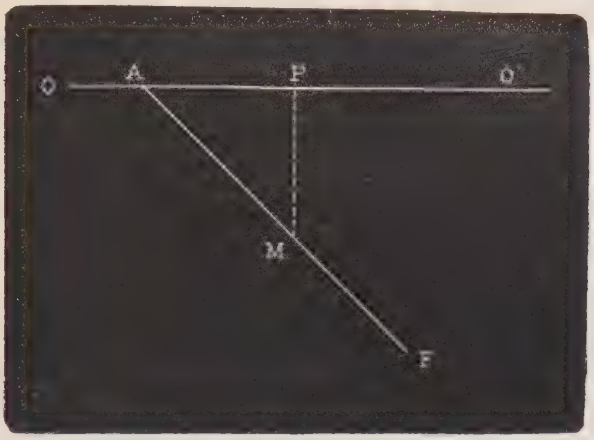

Fig. 4. — A F, ligne de flexion de la lame élastique, aucun corps élastique n'étant interposé.
O O', ligne des origines.
M P, ordonnée au point M.

Examinons maintenant le cas qui se présentera le plus souvent dans ces recherches, où un corps élastique est interposé entre la lame fléchissante et le chariot. C'est le cas qui offre le plus d'intérêt, car les graphiques obtenus dans ces conditions nous donneront la mesure des allongements successifs et des tractions qui les produisent.

Prenons pour corps élastique un corps inorganique dont les allongements, d'après ce qui a été dit plus haut, sont proportionnels aux charges. Le graphique obtenu ainsi, en agissant comme précédemment, est représenté par la fig. 5, dans laquelle les mêmes lignes sont désignées comme dans la fig. 4. AC est la droite décrite par le style lorsque le corps élastique est interposé (2). La ligne AF figurera dans tous les graphiques de

(1) Il faudra tenir compte de l'amplification due au style dans l'évaluation de cette flèche de flexion.

(2) Au moyen d'un dispositif très simple, il est facile d'obtenir pour ces deux courbes

mesure d'allongements, je lui donnerai la dénomination de *ligne de foi*. Au moyen du graphique ci-joint, on peut, pour un point M quelconque, trouver l'allongement du corps élastique et le poids ou la charge qui lui correspond. Pour cela, par le point M il suffit de mener une ordonnée MP et de prolonger

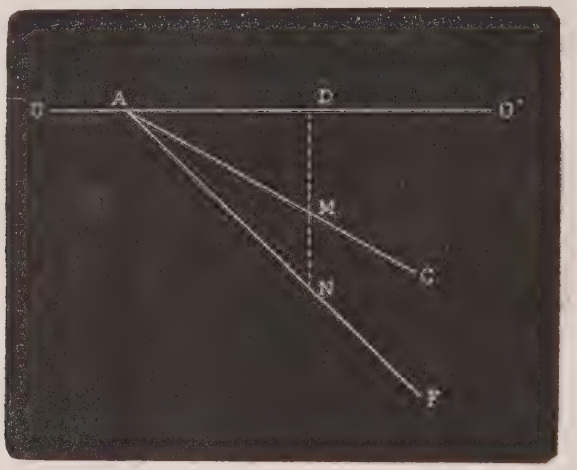

Fig. 5. — A C, courbe d'élasticité.
A F, ligne de foi.
O O', ligne des origines.

cette ordonnée jusqu'à la ligne de foi; MP donne, par une simple mesure, la flèche de flexion ou le poids cherché; MN donne l'allongement correspondant.

Si l'on veut se rendre bien compte de la manière dont a été tracée la ligne AC, on pourra supposer que l'allongement du corps élastique, au lieu de se faire d'une manière continue, au fur et à mesure de la progression du chariot, se fait par intermittences. Cela revient à supposer que le mouvement du chariot agit pendant un temps très court *exclusivement* pour produire une flexion de la lame, le corps élastique, pendant ce temps-là, se com-

la même origine. Celui employé consistait à faire fermer le courant animant le moteur par le cylindre lui-même toujours au même point de sa rotation.

portant comme un corps inextensible, et que pendant le moment suivant, également très court, ce même mouvement ne sert qu'à produire l'allongement du corps élastique. Le tracé idéal mettant en évidence cette décomposition (fig. 6), représentera, non une ligne courbe, mais une ligne brisée plus ou moins régulière, ABCDEH... (1).

La partie AB de cette ligne se confondant avec la ligne de foi a été tracée par le style pendant la flexion de la lame; puis, le corps élastique cédant à la traction, s'est allongé et le

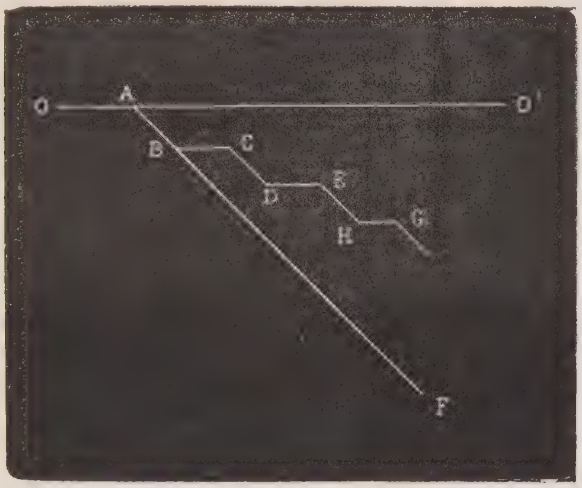

Fig. 6. — Figure schématique pour démontrer le tracé d'une courbe d'élasticité.

style a inscrit la droite BC. De nouveau, le mouvement du chariot a été employé exclusivement à produire la flexion de la lame, et le style a tracé CD parallèle à la ligne de foi, et ainsi de suite. Si maintenant on passe à la limite, et que l'on suppose que ces alternatives de flexion de la lame et d'exten-

(1) La ligne brisée ABCDEH... ne sera pas toujours régulière, car pour des flexions égales de la lame élastique il pourra se faire que des allongements très inégaux se produisent et que l'on ait BC ≠ DE ≠ HG... tandis que l'on aura toujours AB = CD = EH... Il en sera ainsi pour les corps organiques.

sion du corps élastique se succèdent à intervalles infiniment courts, la ligne brisée ABCDE... deviendra une ligne ou une courbe continue. La conclusion à tirer de cette décomposition est que le mouvement de translation du chariot est employé à produire, et la flexion de la lame, et les allongements du corps élastique; par conséquent, que la distance qu'il a parcourue en un point donné M de la droite décrite (fig. 5) est égale à la flèche de flexion MP en ce point, plus l'allongement du corps élastique. Or, la flèche de flexion correspondante à l'abscisse AP devrait être NP; d'où :

$$NP - MP = \text{allongement au point M.}$$

Donc, la règle pratique établie plus haut pour trouver le coefficient d'allongement en un point quelconque est confirmée par cette démonstration.

Vérification des indications données par l'appareil.

Avant d'expérimenter directement sur l'appareil précédemment décrit et afin de savoir à quoi m'en tenir sur la précision des indications qu'il pourrait me fournir, j'ai entrepris une série d'expériences ayant pour but de comparer les allongements donnés par les courbes obtenues et ceux mesurés directement au cathétomètre. Pour faire cette comparaison, la méthode d'opération était la suivante. On prenait un fil élastique de longueur déterminée et de section connue (la section était calculée au moyen de mesures faites au sphéromètre par un procédé spécial), et on traçait au moyen de l'appareil inscripteur sa courbe d'élasticité. Puis, on fixait ce même corps élastique le long d'une règle verticale; et, suspendant à l'extrémité non fixée un plateau de liège très léger, on plaçait des poids dans ce plateau et on mesurait au cathétomètre les allon-

gements correspondants. Les mesures cathétométriques étaient faites le plus rapidement possible afin d'éviter les allongements supplémentaires. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant. Les charges croissent de 5 en 5 grammes; les mesures cathétométriques ont été faites une seule fois, mais les allongements donnés par la courbe sont des moyennes trouvées en se servant de plusieurs courbes. Le corps élastique était un fil de caoutchouc.

Comparaison des allongements successifs mesurés au cathétomètre avec ceux corrélatifs, que donnent les courbes d'élasticité.

CHARGES	ALLONGEMENTS		DIFFÉRENCES EN MILLIMÈTRES
	Mesures cathétométriques	Mesures données par les courbes	
	mm	mm	
5	4,7	4,8	— 0,1
10	6,8	6,6	+ 0,2
15	11,5	10,1	+ 1,4
20	14,3	12,5	+ 1,8
25	14,2	13,3	+ 0,9
30	13,5	12,2	+ 1,3
35	11,6	11,6	0,0
40	9,5	10,7	— 1,2
45	9,1	10,1	— 1,0
50	8,5	9,3	— 0,8

On voit par ce tableau que les indications fournies par ces deux sources de mesures ne varient pas d'une grande quantité. Cependant, on remarquera une différence de $1^{mm}8$ pour une charge de 20 grammes. C'est qu'au voisinage de cette charge l'allongement supplémentaire du caoutchouc est presque égal à son allongement immédiat. De telle sorte que ce n'est point la position d'un point fixe et stable que l'on repère au cathétomètre, mais un point essentiellement mobile qui ne fait que passer devant le réticule de la lunette. On voit dès lors dans quelles limites peuvent être comprises les erreurs sur des

mesures ainsi faites, et combien les mesures données par les courbes méritent plus de confiance.

Des vérifications semblables à celle qui précède ont été faites un certain nombre de fois en faisant varier les dimensions du corps élastique. Les écarts observés n'ont pas dépassé les proportions mentionnées sur le tableau précédent.

Courbes d'élasticité obtenues.

Les graphiques que j'ai obtenus au moyen de mon appareil sont très nombreux ; je n'en reproduirai que quelques-uns, ceux qui me paraîtront les plus utiles à connaître et aussi ceux qui ne dépassent pas le cadre de ce format. Je relèverai aussi pour chacun d'eux les indications consignées sur le registre d'expériences, indiquant dans quelles circonstances le tracé a été fait, et les corrections à effectuer pour les amplifications dues au style et à la longueur de la partie fléchissante de la lame élastique. La longueur de cette partie fléchissante a souvent varié dans le cours des expériences, car, tantôt il importait d'avoir une grande sensibilité et alors d'avoir une grande flexion pour un petit poids ; tantôt, au contraire, il importait de faire varier les charges dans des limites assez étendues, ce que l'on obtenait en diminuant la sensibilité.

Je me suis aussi préoccupé de la cause d'erreur que M. Marey a signalée, relative aux effets de l'arc de cercle décrit par le style inscripteur. Pour éliminer autant que possible cette cause, j'ai suivi les conseils de l'éminent physiologiste et me suis toujours servi d'un style très long, décrivant par conséquent un cercle de grand rayon, et n'ai fait tracer par le style que des mouvements d'assez faible amplitude.

Le tracé 7 de mon registre d'expériences est reproduit ici fig. 7. La ligne OO′ représente la ligne d'origine des flexions,

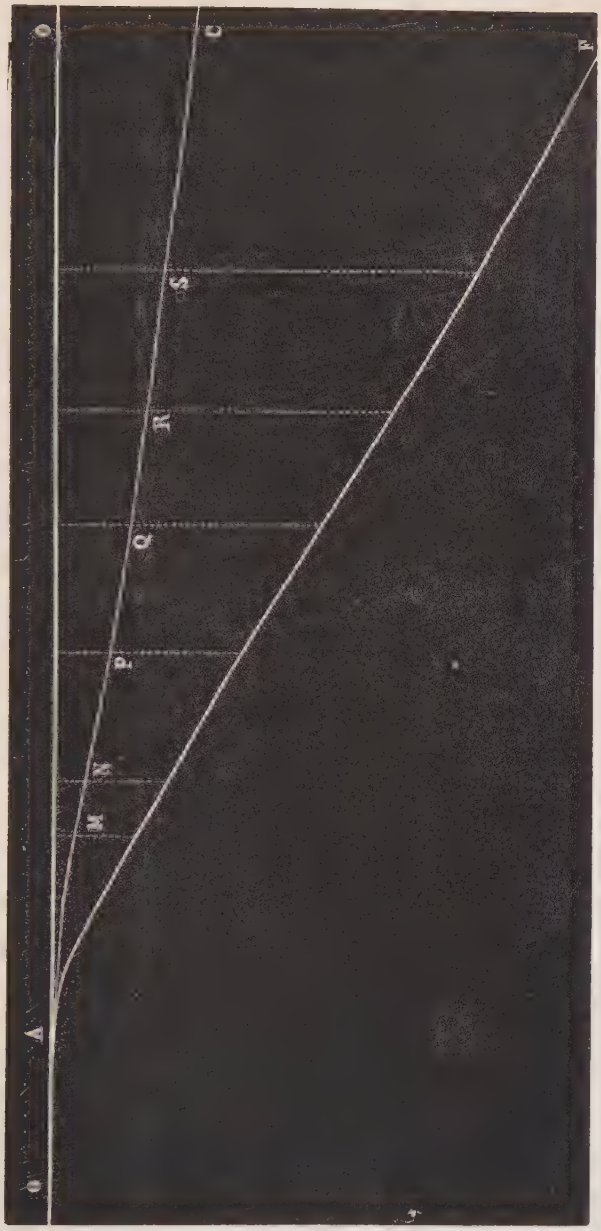

Fig. 7. — Courbe d'élasticité d'un fil de caoutchouc.
O O', ligne d'origine.
A F, ligne de foi.
A C, ligne d'élasticité du caoutchouc.
M N P Q R S, points sur lesquels on a effectué les mesures.

la ligne AF est la ligne de foi ; la ligne AC est la courbe d'élasticité d'un fil de caoutchouc dont la section est de $0^{mmq}680$, et la longueur $20^{mm}2$.

Cette courbe a été prise dans les conditions suivantes : une traction représentée par 5 grammes de poids donne une flèche de flexion de la lame égale à 2^{mm}. Cette flèche de flexion est amplifiée par le style, et le multiple de cette amplification est 6 ; de manière que toutes les fois que la traction augmente de 5 grammes, l'ordonnée de la courbe tracée augmente de 12^{mm} ; ou, en réduisant à l'unité, pour une augmentation de 1 gramme dans la valeur de la traction, l'ordonnée augmente exactement de $2^{mm}4$.

Les ordonnées menées sur le graphique partent des points de la courbe M, N, P, Q, R, S, où la traction est représentée par une progression croissante par unité. Les résultats obtenus, par les mesures indiquées sur cette courbe, sont consignés dans le tableau ci-joint.

Valeurs déduites de la courbe d'élasticité représentée fig. 7.

POINTS DE LA COURBE	ORDONNÉES	POIDS CORRESPONDANTS	PROLONGEMENTS DES ORDONNÉES	ALLONGEMENTS VRAIS
	mm		mm	mm
M	2,4	1 gr.	8,5	1,42
N	4,8	2	11,5	1,92
P	7,2	3	18,0	3
Q	9,6	4	26,0	4,22
R	12	5	33,0	5,50
S	14,4	6	42,0	7

Les poids varient dans des limites peu étendues, comme l'indique le tableau, bien qu'on eût pu prendre des valeurs plus élevées ; mais, en revanche, les allongements sont mesurés avec une grande approximation. Or, le caoutchouc que l'on employait à ce moment, devait servir plus tard pour des déter-

minations (temps perdu, tétanos) où il était important d'avoir exactement les allongements provoqués par des poids faibles.

On pourra remarquer sur la fig. 7 une particularité qui se présente sur tous les tracés analogues. La ligne de foi, au lieu de rencontrer la ligne OO′ à angle vif, est jointe à cette ligne par un arc d'assez petit rayon. D'après la forme de cet arc, il semble qu'on serait en droit de douter de la loi établie plus haut, d'après laquelle les flexions sont toujours proportionnelles aux poids. Il n'en est rien ; la loi est parfaitement exacte et l'arc dont il s'agit ne vient en aucune façon l'infirmer. J'ai, en effet, remarqué qu'en joignant le chariot mobile à la lame flexible par un corps absolument inextensible dans ces conditions (un fil de cuivre de $2^{mm}5$ de diamètre), l'arc disparaissait entièrement et l'angle de jonction était bien formé par deux droites. C'est donc à l'élasticité du fil qui joint habituellement la lame au chariot mobile qu'est dû l'arc en question. J'ai d'ailleurs vérifié expérimentalement que les résultats n'étaient pas sensiblement modifiés par cette cause d'erreur.

Je pourrais reproduire ici nombre d'autres courbes d'élasticité obtenues soit avec des fils différents, soit avec le même fil dont on faisait varier la longueur. Elles n'apprendraient rien de nouveau, si ce n'est que le coefficient d'allongement du caoutchouc est une quantité essentiellement variable, et variable dans de grandes limites (1). Le caoutchouc varie

(1) On peut calculer les valeurs successives de ce coefficient pour le fil dont la courbe est représentée fig. 7. Pour cela, on n'a qu'à appliquer la formule donnée précédemment

$$l = \varepsilon \frac{PL}{s},$$

d'où l'on tire : $$\varepsilon = \frac{ls}{PL}. \qquad (a)$$

En appliquant la formule (*a*) aux mesures trouvées plus haut, on trouve pour le coefficient d'allongement du fil les valeurs suivantes :

Tractions en poids. —	Coefficients d'allongement correspondants.
1 gr.....	0,00160
2 gr.....	0,00318
3 gr.....	0,00332
4 gr.....	0,00350
5 gr.....	0,00370
6 gr.....	0,00393

(Le système d'unité adopté est celui du centimètre gramme.)

d'ailleurs dans sa composition, et la manière dont il est préparé influe beaucoup sur ses propriétés élastiques.

Une des difficultés d'expérimentation qui se présentent lorsqu'on expérimente sur ce corps, c'est de s'assurer de l'intégrité du fil que l'on met en expérience. Pour tourner cette difficulté, je tendais au maximum le fil suspect, après l'avoir fixé suivant la manière indiquée par M. Horvath (1), et je le regardais à la loupe dans toute sa longueur. Je pouvais ainsi choisir une partie parfaitement saine et de section bien constante. C'est, en effet, parce que la section diminue brusquement aux points du fil qui ont été lésés, que les mesures d'allongement peuvent être entachées d'erreur ; aussi, importe-t-il d'avoir des fils à section quadrangulaire que leur mode de fabrication met mieux à l'abri que les autres des petites coupures habituelles.

Courbe d'élasticité d'un muscle de grenouille.

Le graphique reproduit fig. 8 porte le n° 15 sur mon cahier d'expériences. Il a été pris en interposant entre le chariot mobile et la lame fléchissante un muscle de grenouille. La grenouille était fixée sur le chariot mobile au moyen d'épingles, comme le représente la fig. 3. Après avoir coupé le nerf sciatique, on détachait le muscle gastrocnémien sur lequel on voulait expérimenter, de son insertion inférieure ainsi que des muscles voisins, et on ne le laissait attenant au membre que par son tendon supérieur. L'articulation du genou était d'ailleurs solidement fixée à la plate-forme du chariot au moyen d'une ou de plusieurs épingles. Cela fait, on passait un crochet dans la partie cartilagineuse détachée du calcanéum, et on reliait ce crochet directement à la lame flexible.

Le muscle qui a servi à décrire la courbe d'élasticité représentée fig. 8, pesait 0 gr. 33 et avait une longueur de $19^{mm}5$.

(1) Horvath, *Zur Lehre von der Elasticität.* (*Centralblatt*, 1875.)

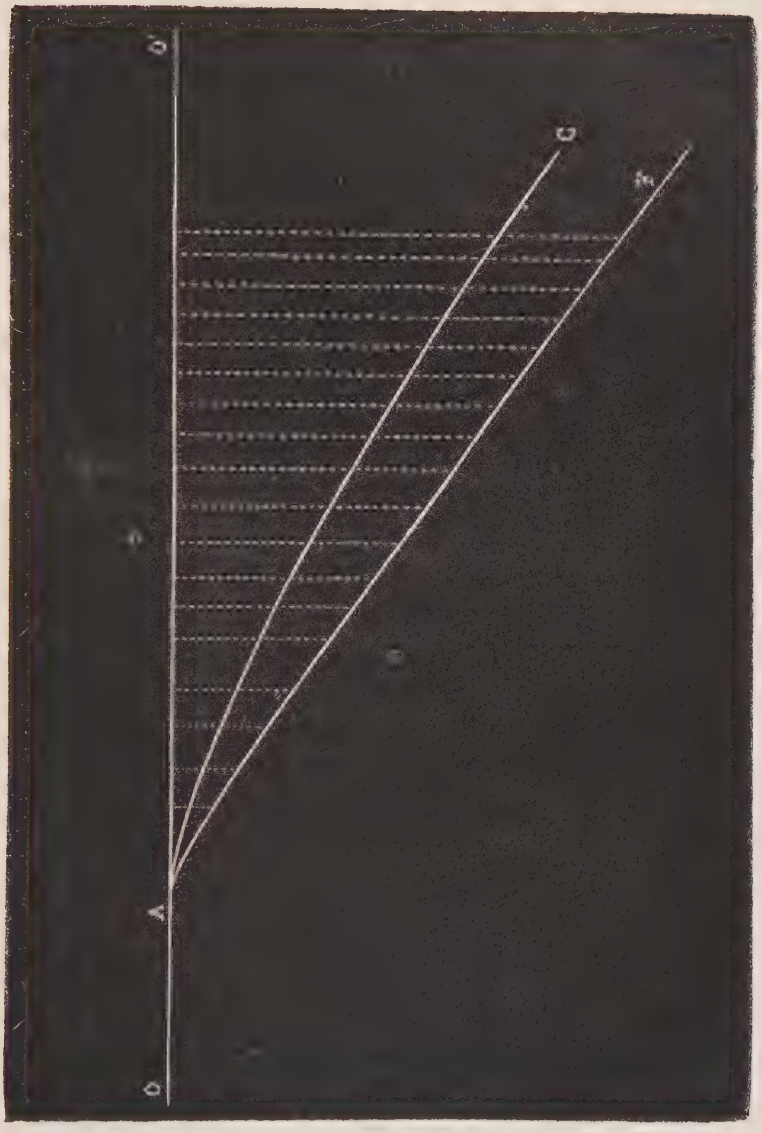

Fig. 8. — Courbe d'élasticité musculaire prise avec un muscle de grenouille.
A O O', ligne d'origine.
A F, ligne de foi.
A C, Courbe d'élasticité. — (Les lignes en pointillé sont les ordonnées menées pour faire les mesures.)

L'expérience a commencé 10 minutes après la section du nerf. La vitesse de rotation du cylindre était la vitesse minima ; le temps qu'a duré l'inscription de la courbe est donc de 13 secondes.

La tension maxima supportée par le muscle dans ce cas particulier est représentée par 18 grammes. Dans d'autres graphiques, la tension a été poussée plus loin, dans quelques-uns même, jusqu'à 100 grammes. Mais j'ai reconnu qu'il ne fallait que peu dépasser le poids de 20 grammes pour que le muscle ne revînt pas exactement à sa longueur primitive ; encore, fallait-il laisser se manifester dans ce cas les effets dus à ce que certains physiologistes nomment la rétractilité supplémentaire du muscle. Les mesures prises sur le graphique et indiquées sur la fig. 8 par le tracé des ordonnées, sont consignées dans le tableau ci-après.

Tableau des allongements et des poids correspondants calculés au moyen de la courbe fig. 8.

ORDONNÉES	POIDS CORRESPONDANTS	ALLONGEMENTS
mm		mm
2,4	1 gr.	0,55
4,8	2	0,75
7,2	3	1,05
9,6	4	1,31
12	5	1,66
14,4	6	1,76
16,8	7	1,86
19,2	8	2,05
21,6	9	2,23
24	10	2,41
26,4	11	2,51
28,8	12	2,61
31,2	13	2,62
33,6	14	2,65
36	15	2,65
38,4	16	2,70
40,8	17	2,70
43,2	18	2,71

Par ce tableau on peut voir que le coefficient d'allongement du muscle expérimenté variait d'une manière assez uniforme ; il a augmenté jusque vers le moment où la traction égalait 5 grammes, puis il a diminué de plus en plus rapidement jusqu'à la fin du tracé de la courbe.

Je termine ici la première partie de ce travail pour passer à la seconde qui me paraît beaucoup plus importante, me bornant à reproduire ces quelques courbes, bien que pouvant, je le répète, en ajouter un grand nombre d'autres.

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE IV

Rôle de l'élasticité dans les phénomènes musculaires.

De la secousse du muscle.

Mon intention n'est pas de passer en revue tous les phénomènes du muscle avec les subdivisions qu'ils comportent ; j'en envisagerai seulement deux : la contraction simple et le tétanos. Ce sont, en réalité, les manifestations de l'activité du muscle de beaucoup les deux plus importantes ; aussi ai-je pensé que mon étude, bien qu'incomplète par le fait, le serait bien moins si elle comprenait ces deux chapitres si essentiels de la physiologie musculaire. Le troisième chapitre que je n'ai pu aborder, celui ayant trait au rôle de l'élasticité dans le rendement en travail du muscle, a aussi son importance. Mais on considèrera cependant que, le travail musculaire étant fonction directe de la contraction, avoir étudié un des éléments de ce travail qui prime tous les autres, c'est avoir déjà ouvert la voie pour des études ultérieures. Ces études, j'espère les reprendre un jour et compléter de mon mieux les lacunes que présente ce premier travail.

Le phénomène de la contraction musculaire par lequel je commencerai, est assez complexe pour avoir été l'objet des

travaux d'un grand nombre de physiologistes. Je rappellerai très brièvement en quoi il consiste et surtout les résultats auxquels a conduit son analyse directe au moyen de la méthode graphique.

Lorsque la fibre musculaire se contracte, on la voit se raccourcir et se gonfler, c'est par ce raccourcissement que le muscle rapproche ses deux insertions et devient organe moteur. Si l'on est maître de l'une de ces insertions, de façon à faire inscrire par un levier mû par le muscle le mouvement qui lui est imprimé, on possède le meilleur moyen d'analyse de la contraction musculaire. C'est ce moyen d'analyse que réalisent pratiquement les myographes. La courbe décrite avec ces instruments par le levier mobile représente, dans ses moindres détails, l'action du muscle sur le levier, et par conséquent le phénomène de la contraction musculaire en général.

La courbe que l'on obtient en expérimentant sur un muscle de grenouille affecte la forme indiquée par le graphique suivant (fig. 9).

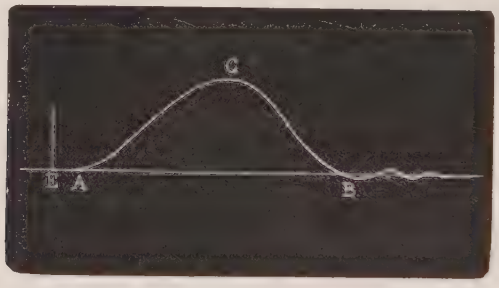

Fig. 9. — Courbe type d'une secousse musculaire (1).

En analysant la courbe ACB, on remarque qu'entre le moment où a lieu l'excitation, cause prochaine de la contraction, moment marqué ici par une ordonnée au point E, et le

(1) Cette courbe est tirée du livre de Rosenthal, *Les Nerfs et les Muscles;* elle a été fidèlement reproduite.

début en A de la courbe musculaire, il existe une certaine longueur EA laquelle représente un temps. C'est ce temps que l'on appelle le *temps perdu* du muscle ; et c'est l'intervalle EA que l'on nomme la *période d'excitation latente*.

La période d'ascension ou de contraction proprement dite est représentée par la partie AC de la courbe ; la période de descente ou de décontraction est représentée par la partie CB. Je ferai de plus observer, pour que la traduction du myogramme soit complète, que la courbe de descente ne revient pas tout d'abord à la ligne des origines pour se confondre avec elle, mais qu'elle descend plus bas, puis remonte au-dessus et enfin l'atteint en effectuant une série d'oscillations d'amplitude décroissante. Cet effet, que je considère comme très important, trouvera bientôt son explication.

Exposé et justification de la méthode d'étude.

Après cette analyse très succincte de la contraction musculaire, et même après avoir lu des travaux volumineux, il est difficile de démêler dans la courbe type les effets dus à chacune des deux propriétés du muscle. L'élasticité est-elle en jeu simplement pour modifier la forme de la courbe, ou, tout à la fois, pour faire varier le temps perdu, la hauteur de la secousse et la durée de la contraction totale? C'est, je le pense du moins, ce que l'on ne peut décider en ce moment, malgré les travaux si nombreux entrepris à ce sujet ; c'est ce que je vais essayer de faire en me servant d'une méthode que je crois neuve, méthode dont le principe a été indiqué plus haut.

Je rappellerai brièvement ce principe. En général, lorsque l'on envisage un phénomène complexe, dans la production duquel les effets de deux causes composantes s'ajoutent, si l'on

connaît l'effet résultant et le mode d'action de l'une des forces agissant seule, on peut déterminer la part qui est due à cette dernière cause dans le phénomène complexe. Si, appliquant ce quasi théorème d'expérimentation à l'étude des effets dus à l'élasticité dans la secousse musculaire, on en vient à étudier à part les effets de cette élasticité, on pourra, de cette étude, déduire le rôle qu'elle joue dans cette manifestation vitale du muscle. Or, pour étudier à part la propriété élastique, il fallait, tout en conservant la manière physiologique d'expérimenter, trouver un corps dépourvu de contractilité et dont la courbe d'élasticité se rapprochât de celle du muscle. Le caoutchouc est, je crois, celui des corps organiques qui convient le mieux ; bien d'autres pourraient être expérimentés, tels que la substance élastique dont est formé le ligament cervical postérieur de certains animaux, le ligament phalangetto-phalanginien rétracteur de la griffe chez les carnassiers, etc. Aucun n'aurait cet avantage de résister à des variations assez grandes dans l'état hygrométrique et la température de l'air sans que sa propriété élastique en soit profondément modifiée.

Le corps propre à l'expérimentation une fois trouvé, il fallait rendre celle-ci de tous points comparable à la méthode myographique. Pour cela, je me suis servi d'un appareil destiné à mettre en jeu l'élasticité du caoutchouc, à développer dans un fil de cette substance une force élastique semblable à celle que développe par sa contraction le disque contractile du muscle dans le disque élastique.

Cet appareil se compose d'une sorte de myographe de Marey à deux leviers A et B parallèles et placés horizontalement à côté l'un de l'autre. Le pivot qui porte l'un d'eux, B, peut se déplacer dans une glissière, qui n'est pas représentée dans la figure, et être fixé dans une position quelconque, de manière que l'on peut augmenter ou diminuer à volonté l'intervalle

compris entre les deux leviers. Sur ces leviers, à une assez faible distance de leur axe de rotation, de façon à avoir plus de sensibilité, sont fixés deux crochets ; c'est entre ces crochets que l'on tend le corps élastique, muscle, fil de caoutchouc, ou autre, sur lequel on veut expérimenter. De plus, un fil partant du crochet du levier B vient se réfléchir sur une petite poulie et supporter un plateau de liège très léger sur lequel on place les poids au moyen desquels on peut faire varier la charge du

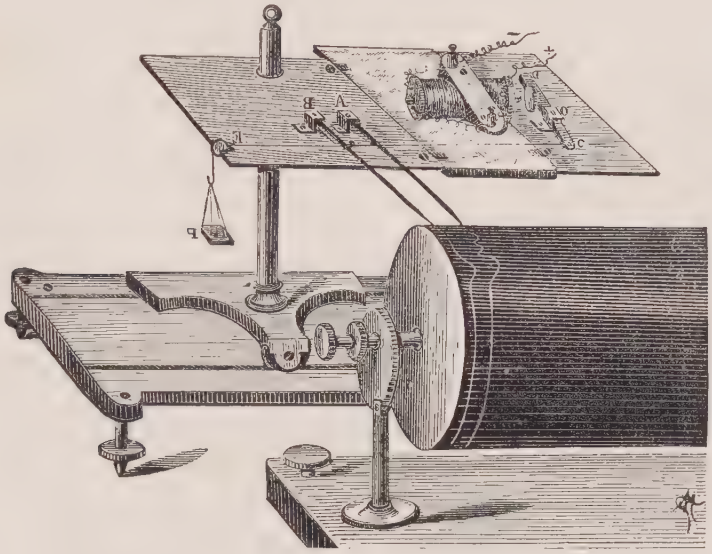

Fig. 10. — Appareil destiné à produire les excitations du fil élastique.
A et B, leviers entre lesquels est tendu le fil élastique.
C D, tige rigide oscillante dont les mouvements sont transmis aux leviers par le fil rigide attaché en A.
P, plateau de liège supportant le poids tenseur.

corps élastique. Quant à la partie de l'appareil qui sert à mettre en jeu l'élasticité du corps en expérience, appareil que par analogie je nommerai *excitateur du caoutchouc,* il se compose d'un système analogue à l'appareil récepteur du télégraphe Morse; c'est-à-dire, d'une tige CD parfaitement rigide

pouvant tourner dans un plan horizontal autour de son axe O, et portant sur une de ses branches un disque de fer doux servant d'armature à un électro-aimant linéaire. L'extrémité C de la tige est liée par un fil inextensible au petit crochet du levier A de façon que tous les mouvements du point C soient exactement répétés par le point d'attache du fil au levier A. On comprend facilement, après cette description, et au moyen de la figure, le fonctionnement de l'appareil. Chaque fois qu'un courant est envoyé dans l'électro, l'armature est attirée et la tige CD oscille ; si le courant cesse, le poids agit alors sur la tige par l'intermédiaire du fil CE et la ramène à sa position primitive. Si l'on envoie dans l'électro un courant de très courte durée, il y aura une oscillation rapide correspondante de la tige, et une tension brusque du fil élastique en résultera ; c'est cette tension brusque, suivie de relâchement, que j'appellerai une *excitation*. L'appareil complet est supporté par le chariot ordinaire de Marey, glissant sur des rails parallèles au cylindre enregistreur sur lequel frottent les deux styles.

Jusqu'à quel point cette tension brusque du fil élastique est-elle comparable à la contraction du muscle, c'est ce que je vais maintenant tâcher de déterminer. Pour cela, j'examinerai d'abord ce qui se passe dans un élément musculaire, lorsque le disque contractile de cet élément entre en activité, en prenant toujours pour base les données histologiques de M. Ranvier ; je supposerai de plus que cet élément musculaire actionne un myographe simple, et est par conséquent fixé par l'une de ses extrémités (disque contractile) et tendu par un poids à l'autre (disque élastique). Au moment de l'excitation, le disque contractile, en agissant sur le disque élastique, diminuera de longueur dans une certaine proportion, la moitié, par exemple. Cette diminution de longueur se fera sentir seulement d'un seul côté, et ce sera la ligne de séparation de

ce disque avec le disque élastique (1) qui se rapprochera du point fixe. Tout se passera donc comme si le disque contractile, au lieu de se contracter, avait reculé au delà du point fixe de la moitié de sa longueur, et que, aussitôt l'excitation passée, il fût revenu à sa position primitive. Ce qui est vrai pour un élément musculaire peut s'étendre à un faisceau primitif et au muscle entier, car le raccourcissement du faisceau, du muscle, n'est qu'une somme de raccourcissements élémentaires.

Si donc on agit sur une substance élastique, disposée comme l'élément précité, de façon à pouvoir la déplacer brusquement d'une petite quantité, on mettra en jeu son élasticité de la même manière que la contraction du disque contractile met en jeu l'élasticité du disque élastique. Les résultats sont donc comparables dans les deux cas et l'on pourra, toute proportion gardée, induire de l'un à l'autre phénomène.

Rôle de l'élasticité dans le temps perdu.

La première particularité qui se présente à étudier dans la secousse musculaire est le temps perdu, ou période d'excitation latente du muscle.

Depuis la découverte, par Helmholtz, de ce temps perdu dans la secousse musculaire, de nombreux travaux ont été faits pour en évaluer la durée. Helmholtz avait fixé cette durée à environ 0″01 et c'est, en général, le chiffre le plus accepté par les physiologistes. Cependant, on trouve dans les divers travaux, surtout dans les travaux récents, des différences très grandes dans l'évaluation du temps perdu (2). Je n'en donnerai pour preuve que le tableau suivant dressé par M. Ch. Richet, en y ajoutant quelques nombres.

(1) Je suppose ici, pour plus de simplicité, que l'élément musculaire se compose simplement d'un disque contractile et d'un disque élastique.

(2) Voir à ce sujet dans les *Travaux du laboratoire de Marey*, t. IV : Mendelssohn, *Étude sur l'excitation latente du muscle.*

La première colonne indique le nom des observateurs, la seconde le temps perdu observé.

Helmholtz...	0″01.
Bernstein ...	0″0145 à 0″0226.
Fredericq ...	0″018.
Ranvier	0″015 (muscles blancs), 0″015 × 4 (muscles rouges).
Volkmann...	0″01.
Rosenthal ...	0″01.
Klunder.....	0″0085.
Mendelssohn.	0″001 à 0″004.
Brucke	0″007.
Place.....	0″004.
Gad.....	0″004.
Ch. Richet...	0″009.

On voit que la variation dans l'évaluation de cette durée d'excitation latente du muscle est comprise dans d'assez larges limites; ainsi, le temps mesuré par MM. Gad et Place est au temps mesuré par M. Bernstein comme 1 est à 5,6. Si l'on voulait prendre pour l'un des termes de comparaison le temps perdu mesuré par M. Ranvier, on arriverait encore à établir des limites bien autrement éloignées.

L'enseignement à tirer de l'examen de ce tableau, c'est que la durée de la période d'excitation latente du muscle est une quantité essentiellement variable, et variable dans de larges proportions. Les causes de ces variations sont nombreuses et ont été indiquées par les physiologistes. On peut les ranger en deux classes : 1° causes physiques : celles qui sont dues aux conditions dans lesquelles on expérimente, que l'observateur peut, par conséquent, mettre en jeu et modifier à son gré; 2° causes physiologiques : celles qui sont dues au fonctionnement même du muscle et qui ne sont pas toujours modifiables. Dans la première de ces classes, on doit ranger la force de l'excitation, la valeur du poids tendant le muscle, l'influence de la température; dans la seconde, trouvent place l'influence de la fatigue, les excitations antérieures, la section du nerf, l'empoisonnement musculaire, l'arrêt de la circulation,... etc., etc.

Or, de toutes ces causes, celles de la première classe seules peuvent modifier l'élasticité, qui est une propriété physique par excellence. C'est donc l'action de ces causes modificatrices que j'ai à envisager ici. Je ferai remarquer de plus que ces causes peuvent agir aussi sur la contractilité du muscle; mais que, suivant exactement le programme que je me suis tracé, je n'examinerai pas davantage ce côté de la question si complexe du temps perdu, la méthode indiquée plus haut devant éliminer les effets relatifs à la contractilité.

Temps perdu du caoutchouc.

Le fil de caoutchouc sur lequel j'ai expérimenté pour reconnaître si l'élasticité du muscle était pour quelque chose dans le temps perdu, avait une longueur variant de 20 à 22 millimètres sur une section de $0^{mmq}680$. Il était placé entre les deux leviers de l'appareil représenté fig. 10 et tendu par un poids variant de 1 à 10 grammes. Pour *exciter* ce fil de caoutchouc, on envoyait brusquement le courant dans l'électro, au moyen d'un manipulateur de Morse ordinaire, ou au moyen d'un fil de platine que l'on enfonçait rapidement dans un bain de mercure pour l'en retirer aussitôt. Le manipulateur de Morse a toujours donné des excitations plus brusques que le fil de platine; de plus, il était facile de graduer la brusquerie des secousses imprimées au caoutchouc par la tige oscillante, en augmentant l'amplitude du mouvement de bascule effectué par le levier du manipulateur.

Au moment où l'excitation se faisait sentir sur le fil de caoutchouc, où la traction de la tige oscillante commençait, le levier A, lié à cette tige par un fil rigide, était aussitôt déplacé et indiquait ainsi sur le graphique le moment exact de l'excita-

tion. Le levier B indiquait l'instant où, par suite de la force élastique nouvelle développée par la traction dans le caoutchouc, celui-ci se *contractait* et entraînait le poids tenseur. Un chronographe ordinaire, en relation avec un diapason, faisant 100 vibrations doubles par seconde, complétait les données graphiques fournies par le tracé.

Pour faire une expérience, la manière de procéder était la suivante : on commençait par égaliser la longueur des leviers, de façon qu'en promenant le chariot sur ses rails, la même génératrice du cylindre fût tracée par les deux styles A et B. On relevait ensuite les leviers, on mettait le cylindre en mouvement, et, lorsqu'il avait acquis toute sa vitesse, on laissait frotter les styles sur le noir de fumée. La ligne des origines une fois tracée, on excitait le corps élastique comme il a été dit plus haut, sans jamais répéter l'excitation plus de deux fois par tour du cylindre, afin que les styles fussent bien exactement revenus sur la ligne d'origine et que leurs points de départ ne fussent pas faussés.

Dans toutes les expériences ainsi faites, le style B a toujours été en retard sur le style A; il y a donc un *temps perdu du caoutchouc,* comme il y a un temps perdu du muscle. Le retard a varié de 0″008 à 0″022. Le tableau suivant donne d'ailleurs la grandeur de ces variations. La 1re colonne indique les poids tenseurs, la 2e les temps perdus, la 3e les numéros des tracés sur lesquels ont été effectuées les mesures.

POIDS TENSEURS	TEMPS PERDUS	NUMÉROS DES TRACÉS
1 gr.	0″008	49
2	0″012	50
3	0″015	51 et 51 bis
5	0″017	52
7	0″020	52 bis
10	0″022	53

Les chiffres donnés représentent des moyennes prises sur un certain nombre de courbes variant de 8 à 12.

La fig. 11 est la reproduction de l'un de ces tracés. Le poids

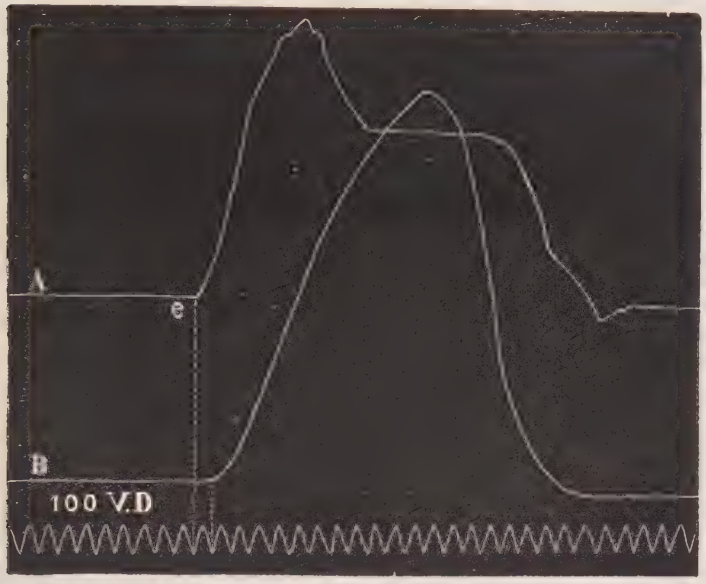

Fig. 11. — Temps perdu du caoutchouc.
A, courbe décrite par le levier A.
B, courbe décrite par le levier B.
e, moment de l'excitation. Le poids tenseur = 1 gr. Temps perdu = 0″008.

tenseur égale 1 gramme; le temps perdu est de 0″008. La fig. 12 reproduit un second tracé de même ordre dans lequel le temps perdu est devenu double, tandis que le poids tenseur a triplé.

Le fait qui ressort clairement des données précédentes, est que le temps perdu du caoutchouc varie avec le poids tenseur. Il augmente lorsque la valeur de ce poids augmente, et diminue avec elle. Or, la même loi s'applique au temps perdu du muscle; il est minimum, en général, pour une tension de 10 grammes et va en augmentant avec la tension. L'élasticité du muscle est donc pour quelque chose dans ce que l'on a

nommé à tort la période d'excitation latente ; à mon avis, *c'est même à la mise en jeu de cette propriété qu'est dû en grande partie le retard du muscle.*

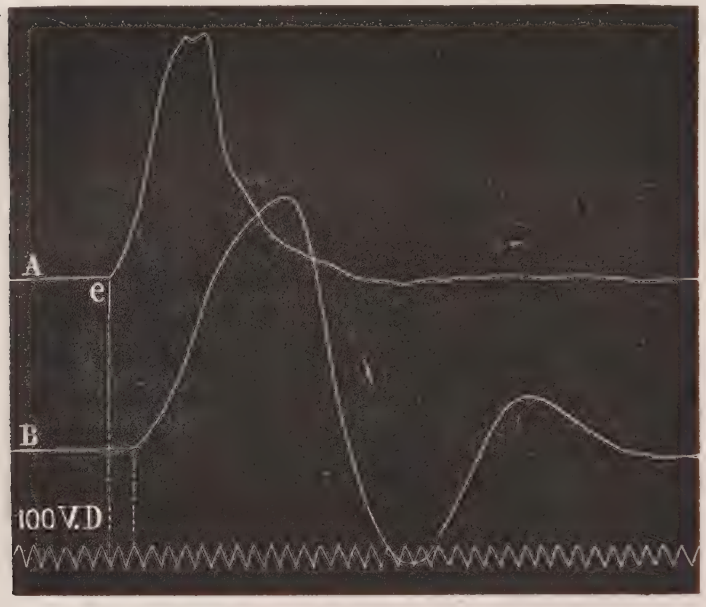

Fig. 12. — Temps perdu du caoutchouc.
A et B, les mêmes que plus haut. Le poids tenseur = 3 gr. Temps perdu = 0"015.

D'après cette manière de voir, voici, en se basant sur les données expérimentales, comment les choses doivent se passer lorsqu'un corps élastique est excité, soit par contraction, soit par traction brusque, comme dans les expériences citées plus haut. Pour le caoutchouc, en particulier, lorsque l'excitation produite par le levier A directement fixé à la tige oscillante commence, le fil élastique, brusquement entraîné par ce levier, et comme fixé au contraire au levier B, à cause de l'inertie du poids tenseur, tend à s'allonger. Par cet allongement, sa force élastique augmente, et il arrive un moment où cette force élastique devient telle, qu'elle l'emporte sur l'inertie du poids et

que ce dernier est soulevé. Donc, trois périodes peuvent être distinguées dans la contraction du caoutchouc, périodes se succédant évidemment sans temps d'arrêt : 1° début de l'excitation ; 2° développement dans le fil, par le fait même de son allongement d'une force élastique croissante ; 3° phénomène sensible de la contraction, c'est-à-dire élévation du poids tenseur. De ces périodes, la seconde seule ne se manifeste par aucun signe visible sur les tracés, c'est la période d'excitation latente des physiologistes ; je la désignerai plus exactement par *période de développement de la force élastique*.

Pour le muscle, une explication analogue peut être donnée. Là aussi, des tractions brusques sont imprimées aux disques élastiques par la diminution subite d'épaisseur des disques contractiles ; une force élastique totale est développée, égale à la somme des forces élastiques engendrées dans chacun des éléments musculaires, et le phénomène sensible du raccourcissement a lieu, phénomène que l'on nomme à tort contraction, lorsque cette force élastique a acquis une certaine valeur qui dépend du poids supporté par le muscle. Les variations du temps perdu qui accompagnent les variations du poids tenseur, trouvent donc dans cette théorie une explication toute naturelle. La force élastique à développer dans les disques élastiques sera d'autant plus grande, que le poids à soulever sera plus grand, et les temps employés pour le développement de forces élastiques inégales seront inégaux.

Il est très facile, dans les graphiques obtenus et dans ceux qui ont été reproduits, de déterminer, pour le caoutchouc, la force élastique maxima développée avant le soulèvement du poids. Par le point où la courbe B quitte la ligne d'origine, on élève une perpendiculaire qui va couper la courbe A en un certain point. L'ordonnée en ce point mesure l'allongement du fil, et comme la force élastique est fonction de l'allongement

on peut la déterminer facilement au moyen des formules précédemment établies.

Le muscle étant un corps élastique devait, mis à la place du caoutchouc dans l'appareil représenté fig. 9, donner des résultats analogues à ceux que l'on connaît. C'est ce qui est arrivé, en effet. Le muscle soumis à ce genre d'excitation a manifesté un temps perdu dont la valeur est comparable au temps perdu physiologique normal. La fig. 13 est la reproduction d'un tracé

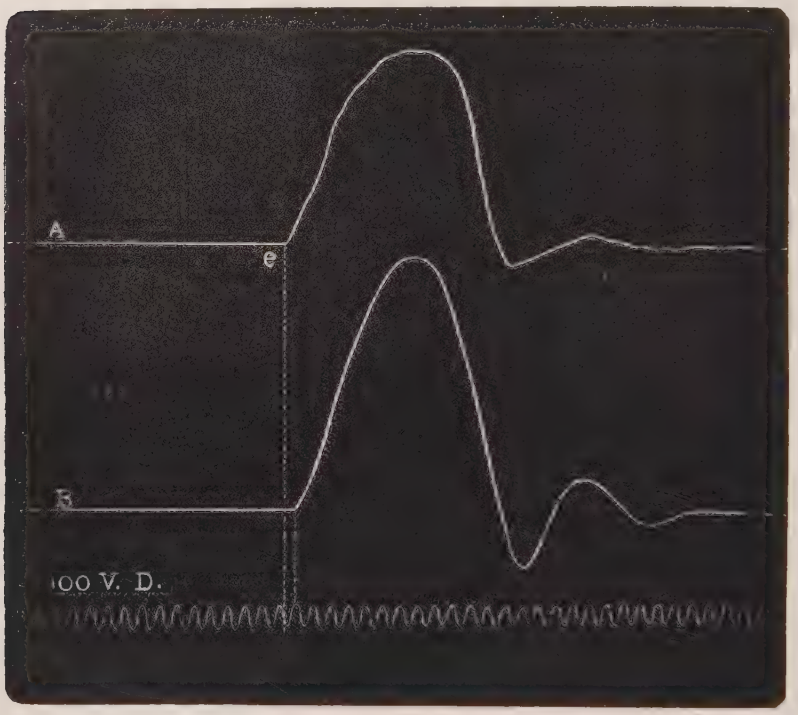

Fig. 13. — Temps perdu du muscle, considéré comme un simple corps élastique.
A, courbe décrite par le levier A.
B, courbe décrite par le levier B. Le temps perdu est de 0"007.

obtenu par cette méthode. Le temps perdu, mesuré au moyen du chronographe faisant 100 vibrations par seconde, a été en

général de 0″008 pour un poids tenseur variant de 4 à 6 grammes.

Courbe de vérification.

Les résultats constants obtenus m'étaient de sûrs garants du bon fonctionnement de l'appareil qui me servait à effectuer les mesures. Cependant, pour que le doute ne fût pas possible sur l'exactitude de mes expériences, j'ai soumis cet appareil à la

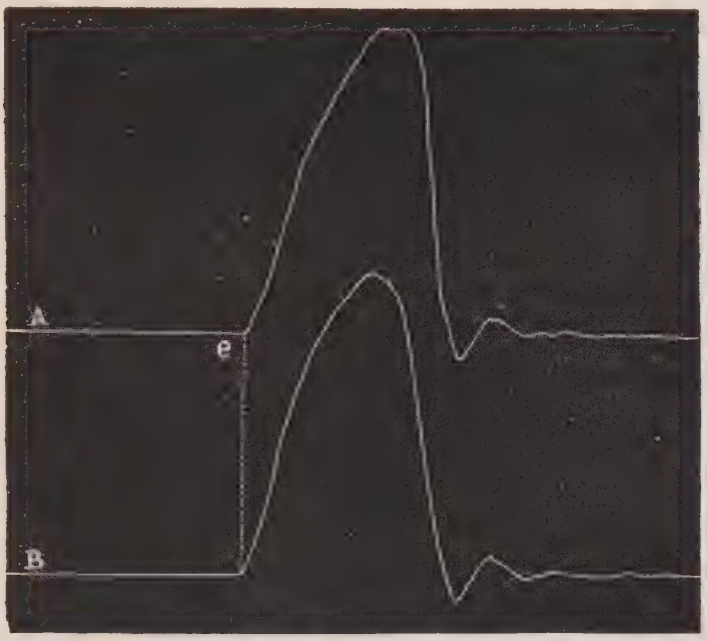

Fig. 14. — Courbe de vérification. On interpose entre les deux leviers A et B un fil non élastique. Le temps perdu est nul.

contre-épreuve suivante. J'ai remplacé les corps élastiques placés ordinairement entre les deux leviers A et B, dont je mesurais le temps perdu par un fil inextensible, autant que possible, un fil de chanvre de même longueur à peu près et de

même section que le fil de caoutchouc précédemment employé. Je procédais avec ce dernier fil comme si j'avais eu affaire à un corps élastique dont j'aurais voulu mesurer le temps perdu. Le tracé reproduit fig. 14 est un de ceux obtenus. On peut y remarquer que le temps perdu est absolument nul, comme on devait s'y attendre; de plus, les moindres oscillations du levier A sont reproduites par le levier B. Si j'avais pu me servir d'un fil rigoureusement *inélastique,* la concordance des mouvements serait absolue.

Étude de la courbe de contraction.

La courbe de contraction obtenue avec le caoutchouc, comme celle obtenue physiologiquement avec le muscle, peut se décomposer en deux périodes : la période d'ascension et la période de descente. Ces deux courbes sont d'ailleurs très analogues par leur forme et de tous points comparables. Une des analogies que j'ai pu vérifier, c'est que la courbe de la secousse du caoutchouc s'allonge à mesure que le poids tenseur augmente ; sa hauteur diminue par le même fait. Ainsi, tandis que cette hauteur peut atteindre jusqu'à 55 millimètres lorsque le poids tenseur est de 1 gramme, elle n'atteint plus que 19 millimètres lorsque ce poids est porté à 10 grammes. Des expériences analogues faites sur le muscle, considéré simplement comme corps élastique, ont conduit à des résultats identiques.

Une particularité remarquable de la secousse musculaire, signalée par certains auteurs, c'est la manière dont s'achève la période de descente. Dans la reproduction de la courbe typique donnée par Rosenthal, cette particularité est très marquée, et j'ai déjà attiré l'attention sur elle. Le levier, en arrivant à la fin de sa course, a éprouvé une série d'oscillations d'amplitudes décroissantes de part et d'autre de la ligne des origines. Je me

suis demandé à quoi étaient dues ces oscillations, et, en examinant les graphiques de la secousse du caoutchouc sur lesquels les amplitudes de ces oscillations sont assez étendues, je suis arrivé à penser que c'était encore là un phénomène d'élasticité. En effet, pendant la période de la décontraction, le poids tenseur, n'étant plus retenu par le corps élastique, tombe, et sa chute est d'autant plus rapide que la décontraction est plus brusque. Arrivé au terme de cette chute, sa force vive est détruite, la traction sur le corps élastique est augmentée d'autant, et un allongement se produit; puis, cet allongement développe à son tour une certaine force élastique, qui soulève le poids, et ainsi de suite, jusqu'à la fin des oscillations.

Il est à remarquer que les courbes décrites par le levier B devraient seules décrire ces oscillations; or, il n'en est pas ainsi, et les courbes tracées par le levier A les présentent également, quoique de bien moindre amplitude. Cela tient au fil qui joint la tige oscillante au levier A. Ce fil n'est pas parfaitement inextensible et son élasticité, quoique très faible, entre en jeu dans ces conditions.

CHAPITRE V

Rôle de l'élasticité dans le tétanos du muscle.

Le tétanos musculaire est un des chapitres les mieux connus de la Physiologie musculaire, grâce aux travaux de nombreux physiologistes, grâce à ceux surtout de Helmholtz et de M. Marey. Je rappellerai brièvement en quoi il consiste. Lorsqu'un muscle ayant reçu une première excitation s'est contracté, et qu'il en reçoit une série d'autres se succédant à des intervalles assez petits pour qu'il ne puisse pas revenir à son état primitif, on dit que le muscle est tétanisé. Le nombre des excitations tétanisantes est donc fonction de la durée de la secousse, de telle façon que, si l'on représente par la fraction de seconde $\frac{1}{n'}$ la durée de cette secousse, le nombre des excitations capables de provoquer le tétanos dans le muscle considéré devra être plus grand que n. La fusion des secousses formant le tétanos peut être partielle ; on dit alors que le tétanos est *incomplet ;* ou bien ces secousses peuvent être entièrement confondues, et l'on dit dans ce cas que le tétanos est *complet* ou *parfait.*

Dans le tétanos complet, le tracé typique donné par le muscle se compose d'une ligne d'ascension semblable à la ligne d'ascension de la secousse simple, suivie d'une ligne parallèle à l'origine, plus ou moins élevée au-dessus d'elle, et ne présentant aucune oscillation. Cette ligne droite est désignée en physiologie sous le nom de *plateau :* dans le tétanos incom-

plet, le tracé est à peu près semblable au précédent, sauf le plateau qui n'existe pas; il est remplacé par une ligne ondulée dont les ondulations ont une amplitude en rapport avec le nombre des secousses tétanisantes. D'après ces définitions, pour que dans le tétanos parfait la fusion des secousses soit complète, il faut qu'une excitation quelconque de la série suive la précédente à un intervalle assez court pour que le muscle ait tout au plus achevé sa période de contraction. En se servant du mode de notation précédent, si $\frac{1}{n'}$ est le temps, exprimé en fractions de seconde, employé par un muscle pour effectuer sa période d'ascension, il faudra, pour que le tétanos soit complet, que le nombre des excitations soit plus grand ou tout au moins égal à n'. Si ce nombre est plus petit que n', mais cependant plus grand que n, le tétanos sera incomplet.

Ce nombre n' d'excitations, minimum, par seconde, n'est pas constant pour des muscles différents; il varie au contraire dans de grandes proportions. Le tableau suivant emprunté à l'excellent livre de M. Ch. Richet [1] indique ces nombres pour une assez grande variété de muscles.

Nombre d'excitations par seconde nécessaires et suffisantes pour le tétanos.

Insectes	300
Oiseaux	100
Cobayes	60
Hommes (muscles striés)	40
Id. (muscles lisses)	2
Lapins (muscles blancs)	40
Id. (muscles rouges)	20
Écrevisses (muscle candal)	40
Id. (muscle de la pince. Été)	20
Id. (id. Hiver)	6
Grenouilles (gastrocnémien)	30
Id. (hyoglosse)	15
Tortues	3
Limaçons	0,1

[1] Ch. Richet, *loc. cit.*

Le nombre des excitations est donc très variable pour des muscles différents; mais il est aussi variable, quoique dans une moindre mesure, pour un même muscle, et il ne faut pas considérer les nombres du tableau comme des chiffres absolus. Les causes de ces variations sont même assez nombreuses; quelques-unes d'ordre physique, comme l'intensité des excitations; d'autres physiologiques et pathologiques, comme la suppression du courant sanguin, la section du nerf, et surtout la fatigue. « Il suffit, dit M. Marey, d'un changement léger » dans la température du muscle, d'un peu de fatigue de » celui-ci, d'une légère variation dans l'intensité des courants » induits, pour changer le nombre des secousses nécessaires » pour produire le tétanos parfait. »

Le rôle de l'élasticité dans le phénomène du tétanos musculaire n'est pas mieux défini qu'il ne l'est dans le phénomène du temps perdu. M. Marey, dans plusieurs de ses ouvrages, parle, il est vrai, de la fusion des secousses par l'élasticité, il a même démontré au moyen d'un appareil très ingénieux combien ce rôle était important au point de vue de la meilleure utilisation du travail du muscle; mais aucune expérience précise n'a été faite, aucun graphique n'a été pris visant directement la démonstration des idées émises.

M. Marey a beaucoup mieux éclairé le phénomène de la fusion des ondes cardiaques par l'élasticité artérielle. Sur ce point important, on trouve dans les travaux du savant physiologiste des expériences précises et concluantes, telles que la constatation de la différence des débits de deux tubes d'égal diamètre, l'un à parois rigides, l'autre élastique ; la constance de l'écoulement à l'extrémité du dernier de ces tubes, lorsque les périodes d'afflux du liquide à l'autre extrémité se succèdent par intervalles. Ce sont des expériences de ce genre que j'ai vainement cherchées dans les livres de M. Marey, où l'idée de

la fusion des secousses du tétanos par l'élasticité du muscle est si souvent indiquée. « C'est l'élasticité des muscles qui éteint » les saccades, écrit-il (1), par lesquelles s'engendre la force » musculaire, et qui donne à la contraction l'apparence » d'un mouvement continu, lorsque, en réalité, c'est une » incessante vibration formée de petits raccourcissements » successifs dont les effets s'ajoutent et se fusionnent entre » eux. » Et encore : « C'est dans l'élasticité du muscle qu'il faut » chercher la cause de la fusion de ces secousses multiples ; elles » s'éteignent comme les saccades des coups de piston d'une » pompe à incendie, disparaissent par l'élasticité de son réser- » voir d'air (2). » On ne peut, certes, exprimer plus clairement une conviction bien arrêtée ; mais des preuves expérimentales venant à l'appui enlèveraient à l'affirmation du savant Professeur ce caractère de simple supposition que sa grande autorité ne suffit pas à lui ôter. On peut, d'ailleurs, faire quelques objections que l'expérimentation peut seule réfuter. Pourquoi, par exemple, n'y aurait-il pas sous l'influence d'excitations successives une modification particulière de l'excitabilité ou de la contractilité musculaires, telle que l'on dût rapporter le rôle important dans le phénomène du tétanos non à l'élasticité musculaire, mais à l'une des deux propriétés précédentes, si facilement modifiables? L'expérience peut seule l'indiquer, et c'est dans ce but que celles qui suivent ont été faites.

Procédé opératoire pour obtenir le tétanos du caoutchouc.

Je me suis servi, comme corps élastique, d'un fil de caout-

(1) Marey, *La Circulation du sang*, ch. IX : Comparaison du rôle de l'élasticité artérielle à celui de l'élasticité musculaire.

(2) Marey, *La Machine animale* : Contraction et travail des muscles. — Sur le même sujet, voir encore Marey, *Travaux du laboratoire*, 1875 : Du moyen d'utiliser le travail moteur de l'homme et des animaux.

chouc semblable à celui employé pour l'étude de la secousse dans les corps élastiques et aussi de l'appareil pour cette même étude précédemment décrit. Le fil en expérience était tendu entre les leviers A et B disposés comme pour mesurer le temps perdu; mais, au lieu d'imprimer au caoutchouc une seule traction brusque, on pouvait, au moyen du dispositif suivant, lui en imprimer un nombre quelconque par seconde. Pour cela, la clef de Morse, qui servait à commander l'électro dans les mesures précédentes, était remplacée par un interrupteur mécanique spécial représenté fig. 15. Cet interrupteur est celui

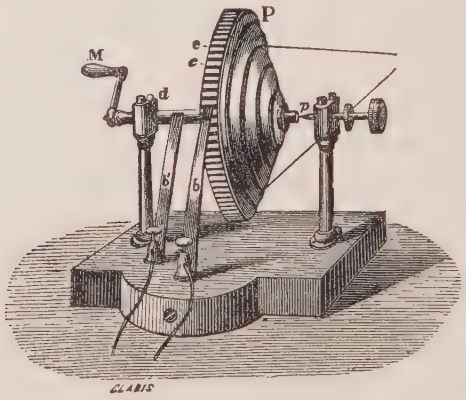

Fig. 15.

précédemment employé par M. Jolyet et par moi dans les recherches communes dont le résultat est consigné dans les Archives de la Société des Sciences physiques et naturelles de Bordeaux (1). Il consiste en un disque conducteur vertical monté sur un axe horizontal; ce disque présente sur sa tranche des dents conductrices et des entre-dents garnis d'ébonite et par conséquent non conducteurs. Deux balais *b*, *b'*, en communication avec deux bornes, frottent, l'un sur l'axe recouvert

(1) *Ibid.*, 10 mars 1882.

d'un manchon de cuivre rouge, *d*, l'autre sur la tranche du disque. Une poulie à plusieurs gorges permet de relier, au moyen d'une courroie, l'interrupteur à un moteur quelconque et de lui donner telle vitesse qu'on voudra. Le moteur dont je me suis servi était la machine magnéto-électrique de Gramme, type de laboratoire, mise en marche par un courant constant.

Pour faire une expérience, on mettait d'abord en marche le cylindre enregistreur, puis l'interrupteur, sans cependant envoyer le courant. Lorsque les vitesses étaient devenues constantes, on faisait frotter les styles et on tournait le commutateur. L'électro recevait le courant toutes les fois que le balai de la roue interruptrice rencontrait un espace conducteur, attirait son armature et faisait osciller la tige rigide; puis l'espace conducteur était remplacé par un entre-dents garni d'ébonite, le courant ne passait plus, la tige oscillante revenait à sa position primitive pour être aussitôt attirée de nouveau, et ainsi de suite. Les oscillations de la tige se suivaient donc à des intervalles régulièrement espacés; ces oscillations étaient transmises par le fil inextensible au levier A et de là au corps élastique. Celui-ci était, par conséquent, agité par des secousses rythmées, dont on pouvait très facilement augmenter ou diminuer la fréquence. Ces secousses sont de tous points comparables, comme je crois l'avoir démontré pour les secousses isolées, aux véritables chocs que le disque contractile de l'élément musculaire imprime au disque élastique.

Résultats.

Les graphiques que j'ai obtenus en expérimentant suivant la méthode indiquée plus haut ont été nombreux; les indications fournies sont remarquables par leur concordance et les courbes obtenues dans les mêmes conditions se ressemblent exactement.

La fig. 16 est la reproduction fidèle d'un tracé (portant le n° 31 sur mon registre d'expériences) obtenu en interposant entre les deux leviers A et B un fil de caoutchouc de 20 millimètres de longueur et de $0^{mmq}680$ de section, tendu par un poids de 3 grammes. Par tâtonnements, on est arrivé avant de prendre ce tracé à déterminer la vitesse de la roue interruptrice nécessaire et suffisante pour avoir en B une ligne sans oscillations marquées.

Dans le tracé fig. 16, la courbe B représente donc le *tétanos du caoutchouc* obtenu au moyen d'un peu moins de 25 excitations par seconde. Ce tétanos est complet et le *plateau* ne présente que de faibles ondulations. Il est moins élevé que le sommet de la courbe initiale au-dessus de la ligne origine.

De ce seul tracé on peut déduire que le fait de la fusion des secousses imprimées à un corps élastique est dû à la mise en jeu de son élasticité et non à toute autre propriété.

Il est facile de vérifier d'ailleurs que cette loi s'applique au muscle considéré comme un corps simplement élastique. En effet, en interposant un gastrocnémien de grenouille entre les deux leviers A et B et produisant au moyen de la roue interruptrice des excitations suffisamment rapides, on a obtenu le graphique que reproduit la fig. 17.

Les vibrations inscrites dans le haut du tracé sont celles du chronographe accordé avec un diapason faisant 100 vibrations doubles par seconde.

La courbe A est celle du levier excitateur directement lié à la tige oscillante par un fil rigide; la courbe B a été décrite par le style B, lié d'un côté au fil élastique, de l'autre au fil qui soutient le poids tenseur. Le poids tenseur, dans cette expérience, était de 5 grammes.

Le nombre des excitations pour obtenir un tétanos complet a varié dans les expériences entre 38 et 41 par seconde. Dans

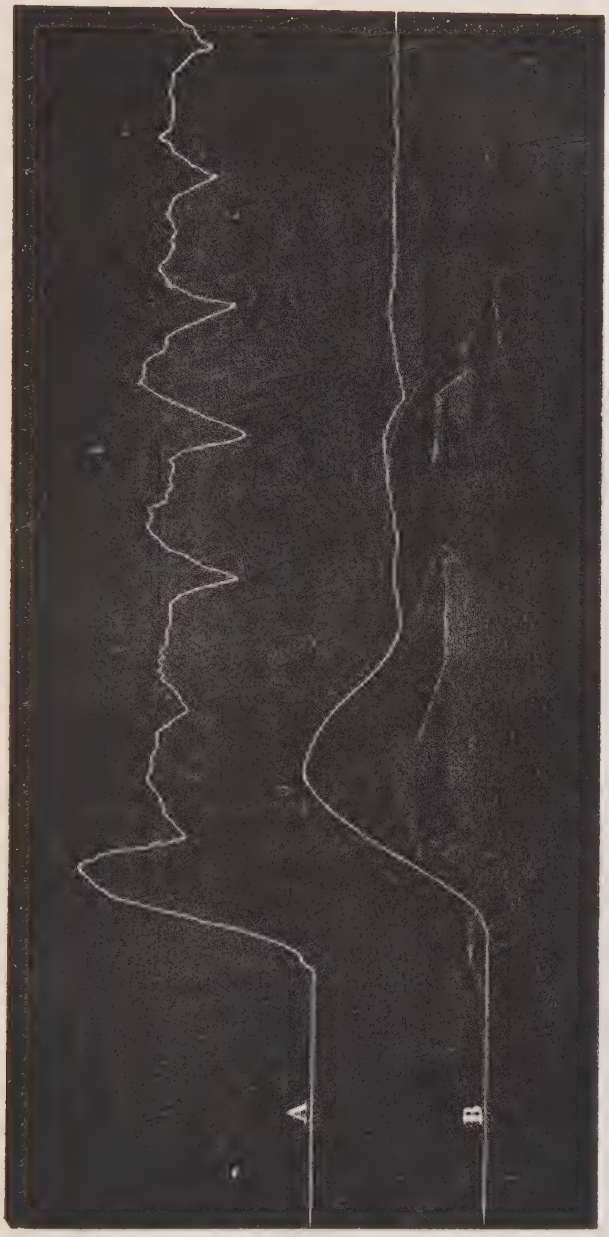

Fig. 16. — Tétanos complet du caoutchouc. Le nombre d'excitations était de 25 par seconde.
A, courbe du levier excitateur.
B, courbe du levier situé après le fil élastique.

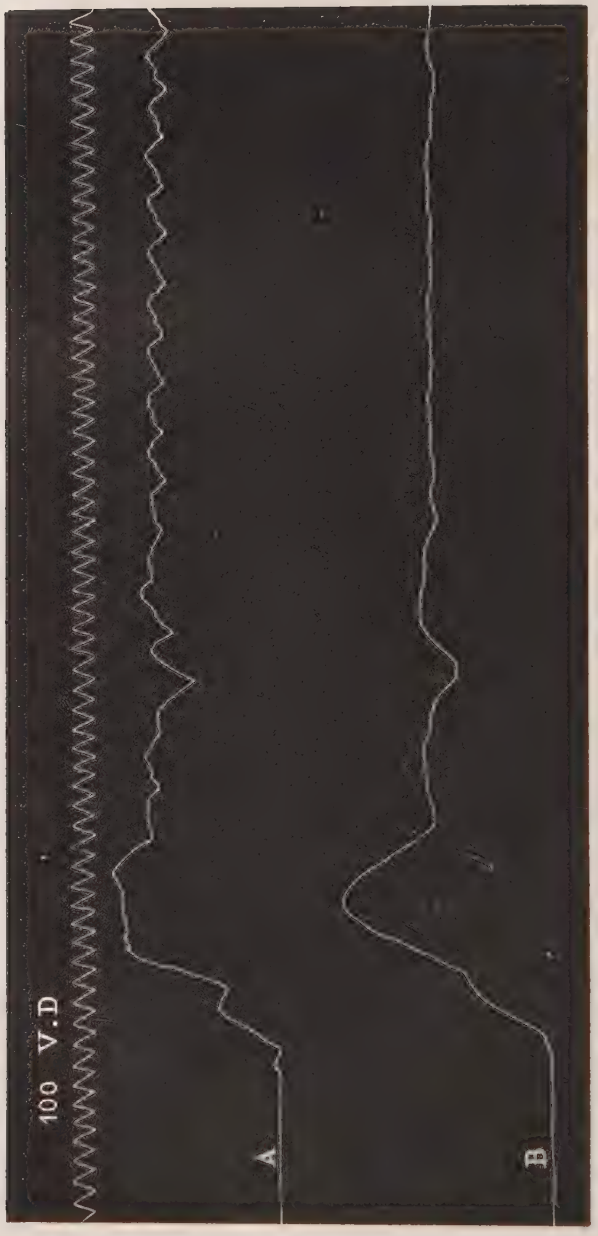

Fig. 17. — Tétanos produit mécaniquement dans le muscle.
A, courbe du levier excitateur.
B, courbe du levier situé après le fil élastique.

le graphique ci-contre, ce nombre est de 40 par seconde. Il est à remarquer que ce nombre diffère peu de celui des excitations nécessaires pour obtenir le tétanos physiologique (30 à 32); cela me semble une frappante coïncidence sur l'explication de laquelle j'aurai à revenir. Cependant, dès à présent, bien qu'il ne soit pas possible d'affirmer qu'il n'y ait dans le tétanos physiologique, surtout dans le tétanos ayant pour cause des excitations volontaires, que le fait absolument physique de la fusion des secousses simples, isolées, du disque contractile par la partie élastique du muscle, je crois pouvoir mettre au premier rang le rôle que joue l'élasticité dans ce phénomène. Ce qui se passe avec un corps comme le caoutchouc, où l'on ne peut invoquer pour l'explication des faits observés que la mise en jeu de cette dernière propriété, le prouve d'une manière éclatante. Si l'on passe en revue les diverses lois trouvées par M. Marey, qui se rapportent au tétanos physiologique du muscle, on trouve que la plupart de ces lois, les plus importantes, s'appliquent aussi au tétanos produit mécaniquement dans un corps élastique. Ainsi, pour le muscle, plus la fréquence des secousses est grande, plus leur fusion est complète; ceci est vrai de même pour le caoutchouc. Le tracé représenté fig. 18 a pour but de montrer que lorsque le nombre des secousses imprimées au corps élastique diminue, la fusion des secousses devient de moins en moins complète.

Le fil de caoutchouc employé est le même que celui qui a servi à obtenir le tracé reproduit fig. 16; mais au lieu de faire interrompre le courant qui anime l'électro 25 fois par seconde, d'avoir, par conséquent, 25 excitations, celles-ci ne se répètent que 6 fois par seconde. Le tétanos est fort incomplet et la courbe décrite par le style B, quoique ne revenant pas à la ligne des orignes pendant toute la durée des excitations, ne manifeste aucun *plateau* indiquant un tétanos complet.

Fig. 18. — Tétanos incomplet du caoutchouc. Rythme de 6 excitations par seconde.
A, courbe décrite par le style excitateur.
B, courbe transmise par le caoutchouc.

Si l'on compare la fig. 18 à celle que donne M. Marey, reproduite fig. 19, des secousses musculaires peu fréquentes incomplètement fusionnées, on s'aperçoit qu'une partie tout au moins dans les deux courbes est presque absolument identique. La figure extraite du livre de M. Marey (1) a été probablement réduite et les oscillations de la courbe qui paraissent en réalité beaucoup plus nombreuses que celles du tracé 18 ne le sont guère davantage. En effet, les excitations du caoutchouc sont de 6 par seconde et celles du muscle dans l'expérience de M. Marey sont de 10 pendant le même temps. Donc, si l'on rapporte les deux figures à la même échelle, on aura une ressemblance presque parfaite dans la partie qui représente les oscillations.

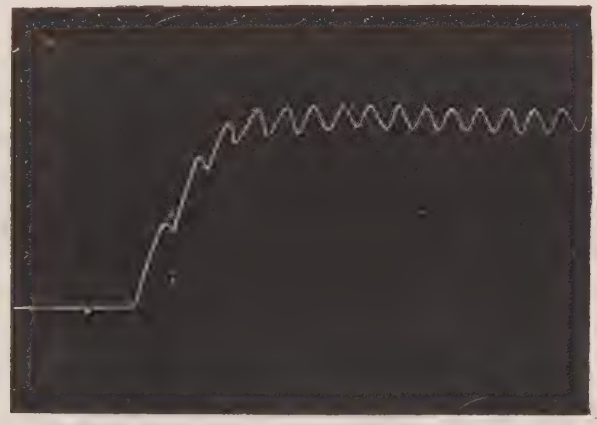

Fig. 19. — Secousses musculaires peu fréquentes, incomplètement fusionnées, d'après M. Marey.

Mais il n'en est pas de même dans les autres parties; ainsi, tandis que dans la courbe de la fig. 18, l'ascension maxima du style s'est faite dès la première excitation, cette même période

(1) Marey, *Du Mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 375.

d'ascension dans la figure tirée de l'ouvrage de M. Marey a duré pendant les quatre premières secousses. A quoi faut-il attribuer cette différence qui est très marquée ici à cause des courbes choisies? Pour ma part, je crois qu'il faut en chercher l'explication dans une propriété physiologique spéciale du disque contractile ou dans une modification de son excitabilité par les secousses successives, mais je ne vois rien là qui puisse être attribué à la propriété élastique du muscle.

On peut aussi au moyen du muscle de grenouille avoir le tracé d'un tétanos incomplet. La fig. 20 reproduit l'un des graphiques obtenus en agitant au moyen de l'appareil ordinaire le gastrocnémien tendu comme un fil de caoutchouc, par des secousses rythmées à 30 excitations par seconde.

J'ai fait reproduire ce tracé de préférence à beaucoup d'autres, bien que sa régularité ne soit pas parfaite, parce qu'il présente une particularité se rapportant au fait signalé plus haut. On remarque, en effet, que la courbe B qui représente le tétanos incomplet du muscle de grenouille, n'atteint pas dès la première secousse la hauteur maxima, mais seulement dès la seconde. Il y aurait donc ici un effet semblable à celui signalé dans la comparaison des fig. 18 et 19. La cause de cet effet peut facilement être dévoilée dans le graphique de la fig. 20, précisément en considérant la courbe A qui reproduit fidèlement la forme de l'excitation. On voit que cette courbe A n'a pas atteint son maximum d'élévation au-dessus de la ligne des origines dès la première oscillation de la tige oscillante, et qu'il s'est produit ce phénomène, rare dans l'appareil à secousses, que l'armature de l'électro n'est pas venue pendant une seule période d'aimantation en contact avec le pôle de cet électro, mais qu'il lui a fallu deux périodes d'aimantation pour effectuer ce chemin. Donc, à une période d'*excitation croissante mais décomposée en deux temps* correspond dans la fig. 20 une

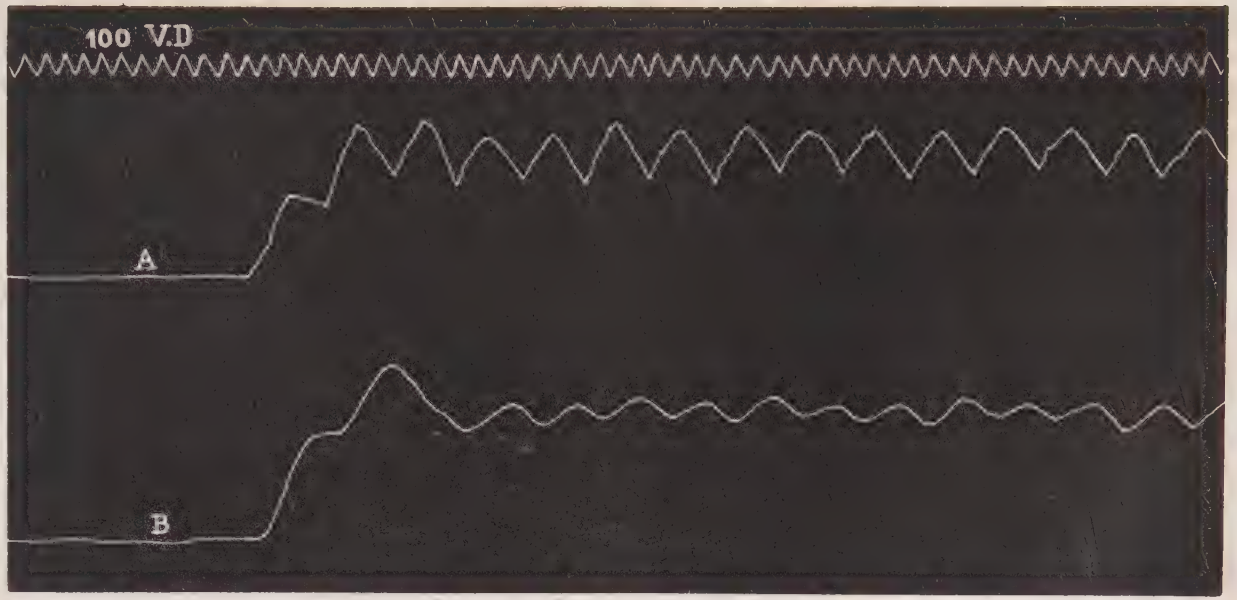

Fig. 20. — Tétanos incomplet d'un gastrocnémien de grenouille *excité* mécaniquement par 30 excitations par seconde.
A et B, comme dans les trois précédents.
Il est à remarquer que la première excitation, comme la secousse initiale, est décomposée en deux temps.

période de *contraction croissante et décomposée de même en deux contractions composantes.*

Pourrait-il se passer dans le muscle au commencement du tétanos, pendant la période d'excitabilité croissante, quelque chose d'analogue?... Je n'ose l'affirmer, mais rien n'empêche et tout semble légitimer une semblable supposition.

Courbes de vérification.

Comme pour le temps perdu du caoutchouc, j'ai voulu vérifier si l'appareil employé ne faussait pas par ses indications les phénomènes que j'analysais. Ici, le doute semblerait plus légitime que pour les tracés relatifs au temps perdu, car les excitations sont très nombreuses et de faible amplitude, par conséquent une cause d'erreur relativement minime aurait pu avoir de grandes conséquences. Ayant donc placé entre les deux styles un fil aussi peu élastique que possible, j'ai agi sur ce fil comme je l'avais fait sur les corps élastiques, tels que le caoutchouc et le muscle de grenouille.

Je me suis d'abord assuré que, pour de faibles oscillations, les deux styles décrivaient, ce qui était facile à prévoir, des courbes identiques. L'amplitude des oscillations n'influe donc en rien sur l'exactitude des tracés.

La seconde vérification que j'ai faite et qui me semble beaucoup plus importante, a donné le tracé représenté fig. 21. Ce tracé a été pris en imprimant à la roue interruptrice une vitesse de rotation comparable à celles qu'elle avait dans les expériences précédentes. On s'arrangea aussi de manière à obtenir une irrégularité très grande dans les oscillations de la tige oscillante, irrégularité indiquée par la courbe A. Malgré ces causes d'erreur multipliées, on voit que la courbe B est bien la symétrique de la courbe A. A peine y remarque-t-on

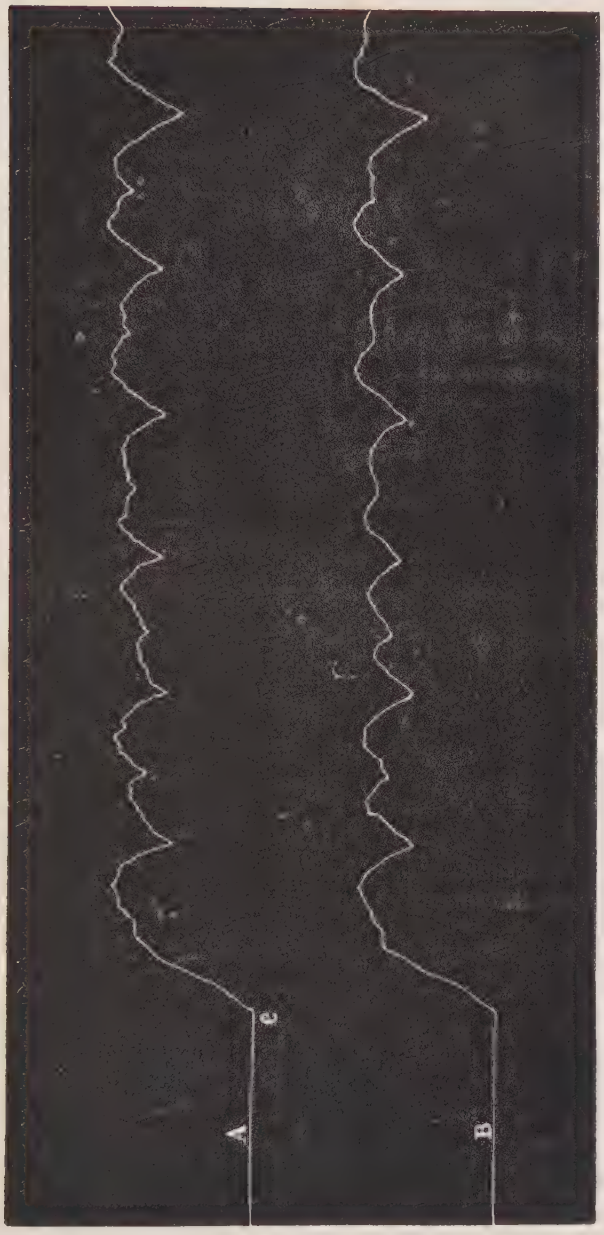

Fig. 21. — Courbe de vérification obtenue en remplaçant les corps élastiques ordinaires par un fil non élastique et en excitant ce fil comme pour avoir le tétanos.

un certain adoucissement des angles nombreux de la courbe A, effet dû certainement, comme je l'ai montré pour les courbes de vérification du temps perdu, à la faible élasticité du fil interposé.

Théorie du tétanos que l'on peut déduire des expériences précédentes.

Il m'a semblé que l'on pourrait tirer des expériences et surtout des graphiques précédents une théorie physique du tétanos. J'indiquerai cette théorie, d'abord pour le tétanos purement mécanique obtenu avec mon appareil déjà signalé; puis je montrerai ensuite que l'on peut y rapporter aussi le tétanos physiologique du muscle. Mais avant, je rappellerai que le style A marque sur le tracé la forme de l'excitation transmise directement au caoutchouc par la tige oscillante. Le style B trace la courbe résultante, somme des effets de l'élasticité du corps élastique et des excitations transmises par ce corps.

Dans le cas d'un fil de caoutchouc interposé entre les deux styles ordinaires, on sait, par l'étude antérieure du temps perdu, que le style A relié à la tige oscillante par un fil inextensible quitte la ligne d'origine avant le style B. Donc les deux mouvements décrits par les styles, à partir du moment où le style B commence son ascension, ne concordent pas; si on les compare à des mouvements vibratoires, on dira qu'ils ont entre eux une certaine *différence de phase*. Cette différence de phase va en augmentant, car l'ascension du style A est beaucoup plus brusque, comme l'indiquent les graphiques, que celle de B. Le style A aura donc atteint le sommet de la courbe qu'il décrit bien avant le style B. Deux effets agiront alors sur B pour retarder son mouvement d'ascension : la diminution de la force élastique du fil de caoutchouc par suite de l'élévation du poids,

et la *décontraction* de A qui commence sa période de descente. Pour ces deux causes, le style B atteindra rapidement le sommet de sa courbe d'ascension pendant que A sera en partie décontracté. A achèvera donc sa période de descente en même temps que B commencera la sienne. A la seconde excitation, A remontera de nouveau; par ce fait même la force élastique du caoutchouc augmentera puisqu'une nouvelle traction s'exercera sur lui. Après un certain temps perdu pour rendre cette force élastique capable d'arrêter dans sa chute le poids attaché au style B, ce dernier style terminera prématurément sa période de descente et commencera sa seconde courbe. Mais alors la différence de phase des deux mouvements aura encore augmenté, et elle augmentera encore pour les mêmes raisons à mesure que les excitations se multiplieront. Pour les mêmes causes, l'amplitude des oscillations de B diminuera et il arrivera un moment où cette amplitude sera tellement réduite, que B mettra à faire une oscillation précisément le même temps que A. Alors l'avance de A sur B n'augmentera plus et un régime constant s'établira. Si cette amplitude réduite des oscillations de B n'est pas très petite, le tétanos sera incomplet; si, au contraire, la valeur de cette amplitude est égale à zéro ou voisin de zéro, le tétanos sera complet.

On comprend, d'après cette théorie, que plus le nombre des excitations par seconde sera grand, plus la différence de phase entre ces deux mouvements sera grande; et, comme l'amplitude des oscillations de B dépend de cette différence de phase, celle-ci devra suivre une marche inverse; elle sera d'autant *plus petite* que les excitations seront *plus nombreuses*. Ce résultat déduit de la théorie précédente est conforme aux données de l'expérience.

Le graphique suivant, reproduit fig. 22, a pour objet de montrer la diminution de l'amplitude des oscillations de A

Fig. 22. — Diminution de l'amplitude des oscillations de la courbe B, à mesure que le nombre des excitations augmente. Passage au tétanos.

à mesure que le nombre des excitations augmente. Il a été obtenu en donnant à le roue interruptrice une vitesse croissante à partir de zéro. Les excitations croissent comme la vitesse de la roue et le tétanos d'abord très incomplet devient de plus en plus complet.

Application de la théorie précédente au tétanos physiologique du muscle.

Pour appliquer au muscle la théorie précédente, il suffit d'admettre l'hypothèse dans laquelle le disque contractile de l'élément musculaire serait animé, pendant le tétanos physiologique, de vibrations synchrones aux excitations qu'il reçoit de l'excitant ; de même que dans le tétanos produit sur le caoutchouc, le style A vibre synchroniquement avec la tige oscillante à laquelle il est lié. On conviendra que cette hypothèse n'a rien d'invraisemblable et qu'on est obligé de l'admettre, d'ailleurs, pour expliquer un phénomène bien démontré, *le bruit musculaire*. Dans la contraction statique du muscle, c'est-à-dire dans la contraction sans production de travail extérieur, comment expliquer, en effet, le bruit musculaire, si l'on n'admet des vibrations de l'élément contractile? De plus, le son résultant de ces vibrations s'est toujours accordé avec celui produit pour les courants induits dans l'appareil excitateur. L'hypothèse indiquée plus haut est donc acceptable, autant qu'une hypothèse non vérifiée directement par l'expérience peut l'être.

On pourra m'objecter de plus, à propos de la comparaison du disque contractile avec le style A lié directement à la tige oscillante, que celui-ci obéit exactement, sans temps perdu, et que la contraction suit immédiatement ou plutôt accompagne l'excitation. C'est vrai ; mais outre qu'il n'est pas démontré qu'il n'en soit pas de même dans le muscle, le temps perdu

(véritable dans ce cas) qui pourrait s'écouler entre l'excitation et la contraction du disque contractile ne change rien à la théorie exposée plus haut. Ce n'est qu'une addition à faire lorsque cette donnée physiologique sera déterminée.

Je terminerai là ce travail, n'ayant pas le temps nécessaire pour pousser plus loin l'étude des phénomènes physiques du muscle. On considèrera cependant, je l'espère, que quelque incomplète que soit cette étude, elle a néanmoins conduit à quelques résultats nouveaux. Je reprendrai plus tard la suite de ces expériences et achèverai de montrer que les propriétés physiques du muscle jouent dans son activité physiologique un rôle prépondérant.

CONCLUSIONS

I. — Étude de l'élasticité musculaire.

Lorsqu'on mesure l'élasticité d'un muscle vivant, surtout d'un muscle en activité, les causes d'erreur dues à la contractilité, propriété appartenant, d'après les travaux de M. Ranvier, à une partie limitée de l'élément musculaire, peuvent et doivent complètement fausser les résultats. Le mode rationnel de mesurer cette élasticité est d'opérer sur le muscle mort, en ayant soin de prendre toutes les précautions pour que la contractilité n'entre pas en jeu et que les propriétés physiques dans lesquelles on place le muscle, seules capables de modifier l'élasticité, soient les mêmes que sur le vivant.

Le meilleur moyen d'étudier la part qui revient à l'élasticité musculaire dans les phénomènes physiologiques, c'est, après avoir étudié l'élasticité dans un corps organique, de soumettre ce corps à des actions mécaniques comparables à celles que le muscle subit à l'état d'activité.

Pour étudier l'élasticité dans les corps organiques et organisés, il faut tenir compte du temps employé à produire les allongements mesurés. La difficulté de la mesure des allongements est très grande ; on y parvient exactement par l'emploi de la méthode graphique. Il vaut mieux inscrire à la fois les allongements et les poids correspondants, conditions remplies par l'appareil décrit plus haut.

Les coefficients d'allongement des corps organiques, du caoutchouc en particulier, varient assez irrégulièrement pour que ces variations ne puissent être représentées par une courbe régulière, comme le voulait Wertheim. On ne peut davantage représenter par une courbe autre qu'une courbe construite graphiquement, les variations des allongements du muscle.

II. — Rôle de l'élasticité dans les phénomènes musculaires.

A. — *Rôle de cette propriété dans le temps perdu ou période d'excitation latente du muscle.*

En expérimentant sur le caoutchouc dans des conditions analogues à celles réunies dans la contraction musculaire, j'ai constaté un temps perdu du caoutchouc comparable au temps perdu du muscle.

Ce temps perdu du caoutchouc varie comme celui du muscle avec le poids tenseur; il est comparable à celui du muscle lorsqu'on se sert d'un fil de caoutchouc de 20 millimètres de longueur et de $0^{mmq}680$ de section, tendu par un poids variant de 3 à 5 grammes.

Le temps perdu du muscle excité mécaniquement au moyen de l'appareil spécial décrit est de $0''008$ en moyenne, nombre très voisin de $0''01$ que l'on donne comme valeur de la période d'excitation latente du muscle excité physiologiquement.

Pour le caoutchouc, le temps perdu est le temps employé par le fil de cette substance en expérience, pour acquérir une force élastique capable de vaincre l'inertie du poids tenseur et de soulever ce poids. La même explication peut être donnée pour le temps perdu du muscle; de telle façon que la période d'excitation

latente serait plus logiquement dénommée, période de développement de la force élastique.

B. — *Rôle de l'élasticité dans le tétanos du muscle.*

De même qu'il y a un temps perdu du caoutchouc, il y a un tétanos du caoutchouc produit par la fusion des secousses que l'on peut imprimer mécaniquement à un fil de cette substance au moyen de l'appareil spécial décrit plus haut.

Le tétanos est complet ou incomplet, comme celui du muscle, suivant la fréquence des secousses, secousses que l'on peut comparer aux excitations physiologiques.

La fusion des secousses musculaires par l'élasticité est donc par le fait même expérimentalement démontrée. D'ailleurs, en considérant le muscle comme un corps simplement élastique et en lui imprimant des secousses de traction suffisamment rapides à l'une de ses extrémités, le style mû par l'autre extrémité donne une ligne droite ou plateau indiquant un tétanos complet.

Il est à remarquer que le nombre des secousses ainsi imprimées au muscle pour produire le tétanos, que j'appellerai mécanique, est à peu près le même, par seconde, que celui des excitations électriques nécessaires pour obtenir le tétanos physiologique.

Le rôle de l'élasticité musculaire dans le tétanos est donc de très grande importance. En se basant sur les données de l'expérience, on peut dire que c'est à cette propriété physique du muscle qu'est due la différence de phase entre les deux mouvements, de la contraction vraie du disque contractile et de la contraction transmise par le disque élastique, mouvements considérés comme vibratoires. Cette différence de phase augmente rapidement avec le nombre des excitations et atteint un maximum qu'elle ne peut plus dépasser. Par ce fait, l'amplitude

des vibrations de la contraction transmise diminue en raison inverse jusqu'à un minimum. Ce minimum une fois atteint, l'état de tétanos du muscle est constitué. Le tétanos est complet si la valeur de cette amplitude minima est voisine de zéro ; il est incomplet pour toute autre valeur.

Vu : *Le Président de thèse,*

A. MERGET.

Vu : *Le Doyen,*

Dr DENUCÉ.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Bordeaux,

H. OUVRÉ.

QUESTIONS DE THÈSE

Anatomie. — Des os du bassin et de ses ligaments.

Physiologie. — Du toucher.

Chimie. — Arsenic, antimoine et leurs principaux composés.

Histoire naturelle. — Des vaisseaux laticifères et de leur contenu.

Pathologie externe. — Les divers moyens d'évacuer les collections purulentes.

Pathologie interne. — De l'état du sang dans la chlorose.

Pathologie générale. — De l'hydropisie.

Histologie et anatomie générale. — Des membranes séreuses.

Anatomie pathologique. — Ramollissement cérébral.

Médecine opératoire. — De l'écrasement linéaire; indications de cette méthode.

Pharmacologie. — Des sirops.

Matière médicale. — Famille de Solanées et plantes utiles qu'elle fournit à la médecine.

Thérapeutique. — Voies et modes d'introduction des médicaments.

Hygiène. — De la sophistication de la bière.

Médecine légale. — De la naissance. Questions médico-légales y afférentes. De la viabilité.

Accouchements. — Des indications et des contre-indications du forceps.

TABLE DES MATIÈRES

Pages

INTRODUCTION 5

PREMIÈRE PARTIE

ÉLASTICITÉ DES CORPS ORGANIQUES

CHAPITRE I

Généralités 9
Résumé historique 9
Travaux de Wertheim 10
— de Weber 10
— de Volkmann 10
— de Wundt 10
— de Marey 11
Définitions 12
Élasticité 12
Force élastique 13
Élasticité de tension; ses lois 14
Coefficient ou module d'élasticité 14
Coefficient d'allongement élastique 15
Extensibilité et rétractilité musculaires 16
Extensibilité supplémentaire 17

CHAPITRE II

Distinctions à établir dans l'étude de l'élasticité musculaire 19
Constitution anatomique du muscle, d'après M. Ranvier 20
L'élasticité musculaire est une propriété physique et se comporte comme telle 21
Portée des mesures faites de l'élasticité musculaire 22

Pages

CHAPITRE III

Nouveau moyen d'étude de l'élasticité musculaire..... 23
Particularités que présente l'élasticité des corps organiques 24
Appareil pour mesurer les allongements des corps organiques 25
Appareil de Wertheim..... 26
— de Weber..... 26
— de Du Bois Reymond 27
— de Marey 27
— de M. Boudet de Pâris..... 29
— de l'auteur 31
Étude de l'appareil..... 34
Vérification des indications données par l'appareil 38
Courbes d'élasticité obtenues 40
Courbe d'élasticité du caoutchouc 42
Courbe d'élasticité d'un muscle de grenouille..... 44

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE IV

Rôle de l'élasticité dans les phénomènes musculaires; de la secousse du muscle 49
Exposé et justification de la méthode d'étude..... 51
Rôle de l'élasticité dans le temps perdu 55
Temps perdu du caoutchouc 57
Explication de ce temps perdu..... 60
Temps perdu du muscle..... 62
Courbe de vérification..... 63
Étude de la courbe de contraction..... 64

CHAPITRE V

Rôle de l'élasticité dans le tétanos du muscle..... 66
Procédé opératoire pour obtenir le tétanos du caoutchouc 69
Résultats..... 71
Tétanos mécanique complet du caoutchouc 73
Tétanos complet du muscle..... 75
Tétanos incomplet du muscle..... 78
Courbes de vérification 80
Théorie du tétanos que l'on peut déduire des expériences précédentes.. 82
Application de la théorie précédente au tétanos physiologique du muscle 85

CONCLUSIONS

Pages

I. — Étude de l'élasticité musculaire..... 87
II.— Rôle de l'élasticité dans les phénomènes musculaires:
A. — Rôle de cette propriété dans le temps perdu ou période d'excitation latente..... 88
B. — Rôle de l'élasticité dans le tétanos du muscle..... 89